

Reinhard Breuer
Chefredakteur

Billiger Jakob bei neuen Großexperimenten?

Die Nachricht kam als Schock für das Forschungszentrum Jülich: Im Juli ließ der deutsche Wissenschaftsrat nach einer ausführlichen Begutachtungsphase wissen, welche der geplanten wissenschaftlichen Großgeräte er für förderungswürdig hält. Dabei rutschte die Europäische Spallationsquelle (ESS) als Neutronenquelle in die letzte von drei Kategorien, für die weitere „spezifische Stellungnahmen notwendig" seien. Diese Einstufung als drittklassig befördert eines der ehrgeizigsten Projekte der Großforschung beinahe ins Aus. „Ohne eine starke Unterstützung Deutschlands", klagte etwa der Vorsitzende des ESS-Forschungsbeirats Peter Tindemann, „wird es extrem schwierig, das Projekt anzuschieben."

Das Thema ist von strategischem Interesse, weil hier die Zukunft nationaler oder europäischer Großexperimente präjudiziert wird, der Empfehlung dürfte jede neue Bundesregierung im nächsten Januar weitgehend folgen. Wie zufällig hat der Wissenschaftsrat die Projekte aber nach ihren Einkaufspreisen bewertet: je billiger, desto besser.

»Auch wer zu früh kommt, den bestraft manchmal das Leben«

Das wirft die Frage auf, was sich Deutschland noch leisten will – außerhalb der Regelfinanzierung der Großforschungseinrichtungen der Helmholtz-Gemeinschaft sowie der 1,1 Milliarden Euro als unser Anteil an der Internationalen Raumstation. Zwei Projekte, die „ohne Vorbehalt für förderungswürdig" eingestuft werden, sind mit zusammen 125 Millionen Euro die vergleichsweise billigsten: das Magnetlabor in Dresden sowie das Forschungsflugzeug „Halo" für Atmosphären- und Erdbeobachtung.

Teurer schon die „bedingt förderungswürdigen" Projekte der zweiten Kategorie: der beim Desy in Hamburg geplante Linearbeschleuniger Tesla, der zu Tesla gehörige Freie Elektronenlaser für ultrakurze Röntgenstrahlung sowie ein Beschleunigerkomplex für die Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt. Tesla hat wohl nur eine Chance, wenn sich genügend viele Nationen beteiligen.

Sicherlich muss ein internationales Großprojekt nicht unbedingt in Deutschland landen. Klar ist zudem, dass der Beschleuniger Tesla und die Spallationsquelle nicht beide bei uns gebaut werden. Und man kann daran erinnern, dass am Cern bei Genf gerade der LHC-Beschleuniger entsteht, mit gewaltigen Problemen und Budgetüberziehungen – nicht gerade eine Aufforderung an Europa, diese Erfahrung demnächst zu wiederholen.

Als teuerstes Großgerät würde die europäische Spallationsquelle mit 1,5 Milliarden Euro zu Buche schlagen. Man kann nun darüber spekulieren, warum gerade die ESS auf den dritten Rang verwiesen wurde. Denn eine Neutronenquelle liefert der Forschung ein universales Hilfsmittel, von der Medizin bis zur Materialforschung (siehe SdW 08/2002, S. 12). Womöglich hat sich das Forschungszentrum Jülich (als ein Standortbewerber) nur zu früh gemeldet: In Garching bei München wartet schließlich eine fast fertige Reaktor-Neutronenquelle auf ihre Nutzung. Da der Reaktor nun mal existiert, sollte er trotz aller politischen Querelen zuerst genutzt werden. Auch wer zu früh kommt, den bestraft manchmal das Leben.

INHALT



TITELBILD:

Kein realer Spiegel könnte Äpfel und Birnen auf diese Weise abbilden. Doch in der seltsamen Welt der Atomkerne herrscht offenbar das Gesetz der „Supersymmetrie“.

Bild: Thomas Braun / Spektrum der Wissenschaft / Bryan Christie Design



TITELTHEMA: KERNPHYSIK

Supersymmetrie in Atomkernen

Seite 34

Vereinheitlichte Theorien der Urkräfte sagen für Elementarteilchen die Eigenschaft der „Supersymmetrie“ vorher. Überraschenderweise haben Forscher diese Qualität nun in der Kernphysik nachgewiesen, und zwar für Platin und Gold.

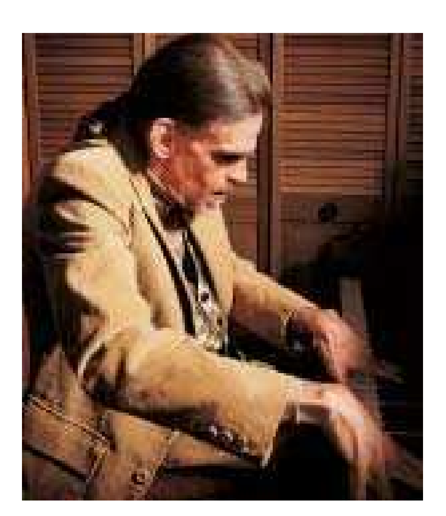


VERHALTEN

Der Sexualtrick der jungen Orang-Utans

Manche jugendlichen männlichen Orang-Utans täuschen körperliche Unreife vor. So bleiben sie von den Revierbesitzern unbehelligt, wenn sie sich Weibchen in eindeutiger Absicht nähern. Hormonell sind sie aber erwachsen und zeugen Nachwuchs.

Seite 26



INTELLIGENZ

Inselbegabungen

Der einfache Alltag mag autistische oder geistig behinderte Menschen überfordern. Doch verblüffenderweise brillieren manche mit einem phänomenalen Gedächtnis und genialen künstlerischen Fähigkeiten.

Seite 44



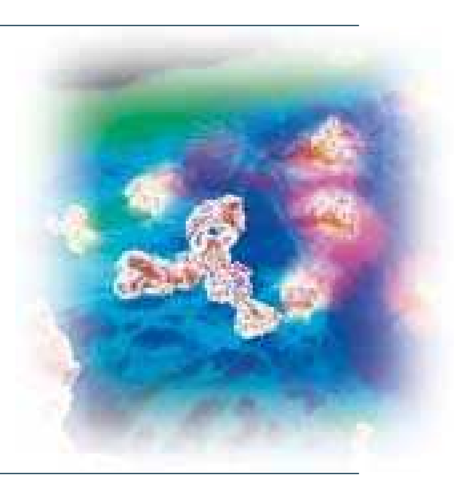
FRÜHES UNIVERSUM

Über den Ursprung der Galaxienarten

Neue Beobachtungen und Computersimulationen erlauben den Astronomen, die Geburt von Sternsystemen zu rekonstruieren. Damit sind sie der Ursache für die verwirrende Vielfalt der Galaxienformen auf der Spur. **Seite 54**

MONOKLONALE ANTIKÖRPER

Die Rückkehr der Zauberkugeln



Anfangs als neue Wunderwaffen der Medizin gefeiert, waren maßgeschneiderte Antikörper vor wenigen Jahren so gut wie abgeschrieben. Doch nun kommen sie als hochwirksame Mittel gegen Krebs und andere schwere Erkrankungen reihenweise auf den Markt. **Seite 64**

WAHLEN (TEIL II)

Die Ungerechtigkeit der Wahlverfahren



Absolute Wahlgerechtigkeit gibt es leider nicht. Aber die Mathematik kann immerhin die Probleme offen legen und Teillösungen anbieten.

Seite 73

TECHNOSKOP-MAGAZIN

Robotik **Seite 88**

Alduro – ein Arbeitstier aus Stahl

Wenn das Gelände steil und holprig wird, sind Beine allemal besser als Räder. Roboter Alduro gleicht deshalb auch eher einem Elefanten als einem Traktor. Zumindest im virtuellen Raum.

Außerdem:

- Nanosand in der Membran
- Herzbild wider den Infarkt
- Technogramm

FORSCHUNG UND GESELLSCHAFT

REZENSIONEN

MATHEMATISCHE UNTERHALTUNGEN

WEITERE RUBRIKEN

Dunkle Materie



Das Rätsel quält Astronomen und Teilchenphysiker seit langem: 95 Prozent aller Materie im Kosmos ist unsichtbar. Gleichwohl verrät sie sich durch ihre Schwerkraft. Eine kleine Modifikation von Newtons Gesetz für die Beziehung zwischen Kraft und Beschleunigung könnte das Mysterium lösen.

Weitere Themen im Oktober

Ungerechte Wahlverfahren (Teil IV)

Wahlgesetze von zweifelsfrei demokratischem Charakter produzieren die sonderbarsten Widersprüche – im Parlament von Mexiko ebenso wie in den Städträten und Kreistagen Bayerns.

Bakterien und Insekten-Evolution

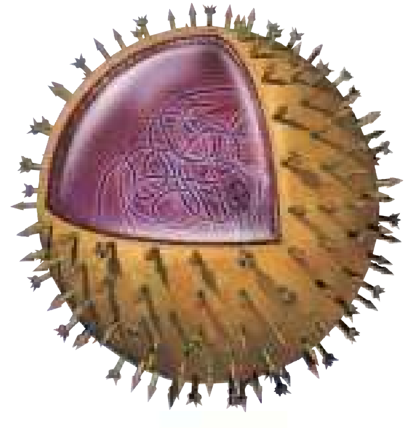
Das Bakterium *Wolbachia* manipuliert die Fortpflanzung vieler Insekten und anderer wirbelloser Tiere. Trieb es die Aufspaltung in neue Arten voran? Jetzt ist die Mikrobe auch im Zusammenhang mit menschlichen Parasiten im Gespräch.

Die neue Sklaverei

Mädchen, die zur Prostitution gezwungen werden, Bauern in Schuldenknechtschaft, geprügelte Haussklaven – in den Schattenzonen der Weltwirtschaft blüht trotz internationaler Ächtung der Menschenhandel.

Kunstherzen

Vorübergehend, vielleicht sogar dauerhaft sollen sie ein erlahmtes Herz unterstützen oder einmal ganz ersetzten. Wie weit ist diese medizinische Technik?



Viren im Visier

Gegen Bakterien gibt es Antibiotika, aber gegen Viren war die Medizin lange machtlos. Vor allem dank der Gentechnik hat sich dies nun geändert. Die Entzifferung des Erbguts von Viren deckte Achillesfersen auf, an denen inzwischen etliche Medikamente erfolgreich ansetzten.



Die Fabrik auf dem Chip

Ganze Chemie- und Pharmafabriken sollen bald auf einem Labortisch Platz finden: Dank Mikrotechnik werden Rohre und Kessel zu haarfeinen Kanälen und winzigen Mischern. Diese Liliput-Fabriken sind flexibler – die Ausbeuten steigen und es fallen weniger unerwünschte Nebenprodukte an.

Forschungspolitik vor der Wahl
Forschung und Gesellschaft – August 2002

Die Beiträge zur „Forschungspolitik vor der Wahl“ enthalten einige Angaben, die nicht mit den Tatsachen übereinstimmen. So haben wir 1998 nicht die Verdopplung des Etats für Bildung und Forschung in Aussicht gestellt, sondern die der Investitionen in diesem Bereich. Und hier kann sich das Wachstum des Etats sehen lassen. Er ist mit rund 9,3 Milliarden Euro für das Jahr 2003 der höchste, den es je in der Geschichte der Bundesrepublik gegeben hat. Im Vergleich zum Jahr 1998 sind das rund 2 Milliarden Euro mehr. Zwischen 1993 und 1998 hingegen wurde der Bildungs- und Forschungsetat noch um 366 Millionen Euro gesenkt. Und anders als in Ihrer Zeitschrift erwähnt, gibt es im Bundesministerium für Bildung und Forschung auch keinen Etat für „Wehrforschung und -technik“.

Edelgard Bulmahn
Bundesministerin für Bildung und Forschung

Die Ursprache der Alteuropäer – Mai 2002

Die vorgebrachten Argumente sind wenig überzeugend. Auf der Telefondiskette von Deutschland gibt es zwar rund 150 Einträge mit „Eber-“, „Ever-“ und „Ewer-“, aber genauso viel mit „Hirsch“, kaum weniger mit „Reh“ und dann nochmal halb so viel mit „Schwein“. Sollten wir nicht vielleicht annehmen, dass die alten Deutschen (oder ihre Vorgänger) Wildschweinbraten ebenso schätzten wie die beiden berühmten Gallier? Und wo sind die entsprechenden Ortsnamen in Frankreich? Mein Routenplaner weist unter 5000 Orten gerade eine Hand voll mit den zitierten Anfangsbuchstaben auf. Keine sehr ermutigende Ausbeute für das Kernland der Vaskonen. Und dass der Name eines Ortes in einem Pyrenäental auf die baskische Sprache zurückzuführen ist, ist doch eher selbstverständlich.

Es ist wenig wahrscheinlich, dass Mitteleuropa während der letzten Kaltzeit völlig unbewohnt war. Die eisfreien Gebiete Mitteleuropas und Asiens dürften vielmehr von halbnomadisch lebenden Stämmen besiedelt gewesen sein, die verwandte Sprachen benutzten. Daraus lassen sich zwanglos die von diversen Seiten postulierten Ähnlichkeiten des Baskischen mit der kaukasischen, jenesseischen und auch der indoeuropäischen Sprachfamilie erklären (weshalb ich nicht in Frage stelle, dass das Baskische sich von der „Ursprache der Alteuropäer“ ableiten lässt).

Prof. K. R. Schreitmüller, Hessisch Oldendorf

Wie der Mensch das Denken lernte – April 2002

Da modernes Verhalten in sehr kurzer Zeit entstand und die benötigten geistigen Fähigkeiten im Rahmen der „Darwin’schen Evolution“ nicht so schnell durch selektive Prozesse hätten bereitgestellt werden können, wirft Tattersall die Selektion einfach über Bord. Er verzichtet großzügig auf diesen einzigen bekannten Mechanismus zur Erzeugung komplexer Funktionalität und versucht die Entstehung des komplexesten funktionalen Gebildes der Biosphäre – des menschlichen Gehirns – ohne Rückgriff auf dieses Hilfsmittel zu erklären. Stattdessen wird die statistisch unsinnige Vorstellung verbreitet, dass alle benötigten Komponenten des Sprachsystems sich eher zufällig im menschlichen Erbgut angesammelt hätten, um erst beim ebenfalls zufälligen Auftauchen des letzten benötigten Bausteins Sprache und symbolhaftes Denken zu ermöglichen. Diese komplexen Fähigkeiten sollen nun auch noch „brachgelegen“ haben, bis sie tatsächlich benötigt wurden – eine Vorstellung, die der Beobachtung widerspricht, dass nicht genutzte funktionale Komponenten im Verlauf der Evolution zurückgebildet werden. Offensichtlich stand Darwin einem Verständnis evolutionärer Prozesse vor 140 Jahren wesentlich näher, als Herr Tattersall es heute tut.

Abstraktes Denken ist eher ein Nebenprodukt der visuellen Wahrnehmung als der Sprachentwicklung. Führende Kognitionsforscher weisen schon seit Jahrzehnten auf strukturelle Parallelen höherer geistiger Leistungen des Menschen zu Prozessen hin, die im Dienste der visuellen Wahrnehmung stehen.

E. Kirschmann, Hannover

Briefe an die Redaktion ...

... richten Sie bitte mit Ihrer vollständigen Adresse an:

Spektrum der Wissenschaft
Ursula Wessels
Postfach 10 48 40
69038 Heidelberg

E-Mail: wessels@spektrum.com
Fax: (0 62 21) 91 26-729

Dünne Schichten auf Sonnenfang
Wissenschaft in Unternehmen – Juni 2002

Die im Bild gezeigte Prototypanlage wurde – anders als in der Bildunterschrift angegeben – von den Partnern ZAE Bayern, T.A.S. GmbH, ThermoSolar und Universität Muscat errichtet. Aufbauend auf den Erfahrungen wird die Firma TiNOX die Serienproduktion von Anlagen dieses Typs aufnehmen, wobei durch die Verwendung von TiNOX-Materialien eine deutliche Performanceverbesserung bei gleichzeitiger Kostenreduzierung erzielt werden kann.

Hendrik Müller-Holst, TiNOX GmbH, Sauerlach

Die Jäger der höchsten altsteinzeitlichen Kultur hinterließen auch eine Anzahl von Sprachelementen.



Wie Stechmücken die Ohren spitzen

Forschung aktuell – Juni 2002

In diesem Beitrag kommt mir einiges nicht so sehr neu vor. Neu ist sicherlich, dass die Antennen von Mücken in Eigenschwingung gebracht werden. Aber warum gibt es keinen Hinweis darauf, dass die Fühler der Mücken schon in den 50er/60er Jahren als Hörorgane erkannt und beschrieben wurden? Die wichtigsten Arbeiten darüber führten Horst Tischner am Institut für Schwingungsforschung, Tübingen, und Alfred Schief aus. Die Histologie des Johnston-Organs wurde von Helmut Risler, damals Universität Tübingen, gemacht, mit besseren Bildern als den im Artikel dargestellten.

Die abgebildeten Antennengeißeln halte ich eher für Antennen von Zuckmücken (Chironomidae) oder Büschelmücken (Chaoboridae) als von Stechmücken (Culicidae), denn deren Antennen haben weit weniger und viel kürzere „Haare“ auf den Geißeln. Zuckmücken und Büschelmücken sind keine Blutsauger, die Männchen der Stechmücken auch nicht. Richtungshören können wohl alle drei Mückenfamilien. In Tübingen wurde mit Culiciden gearbeitet.

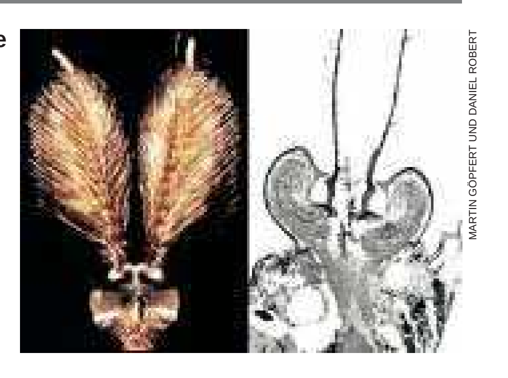
Prof. W. Harder, Tübingen

Antwort der Autoren Göpfert und Robert:
Die Geschichte der Stechmücken-Hörforschung kam in unserem Artikel aus Platzgründen zu kurz.

Die antennalen Hörorgane von Stechmücken wurden vor nahezu 150 Jahren entdeckt. 1855 beschrieb Christopher Johnston das nach ihm benannte Johnston'sche Organ. Auf Grund anatomischer Analysen sagte er voraus, dass dieses Organ Stechmücken-Männchen als Hörorgan dient und diese das Summen fliegender Weibchen mit Hilfe ihrer Antennen detektieren. Diese Entdeckung regte zu weiteren Forschungen an. Hervorzuheben sind die Arbeiten von Mayer (1874), der erstmals schallinduzierte Schwingungen der Antennengeißel untersuchte, die detaillierten, wunderschön illustrierten histologischen Analysen von Eggers (1924), die Verhaltensversuche von Roth (1948), die Johnston's Voraussagen rundum bestätigten, und die mechanischen und elektrophysiologischen Analysen von Tischner, Schief (1955) und Belton (1974) sowie die anatomischen Untersuchungen von Risler (1953, 1967), Boo und Richards (1975).

In Anbetracht der Bedeutung von Stechmücken als Krankheitsüberträger ist Stechmücken-Hörforschung auch heute noch hochaktuell. Durch neue technische Entwicklungen erhalten wir vertiefte Einblicke in die Mechanismen des Stechmücken-Hörens. Das Erkennen potenzieller Ansatzpunkte für neue Formen der Stechmücken-kontrolle steht dabei im Vordergrund. Darüber hinaus belegt diese Forschung überraschende Parallelen zwischen Stechmücken-Hörorganen und dem menschlichen Ohr. Darüber berichtet unser Artikel.

Es ist richtig, dass antennale Hörorgane auch bei anderen Mückenfamilien auftreten. Bei dem in unserer Arbeit abgebildeten Tier handelt es sich um ein Männchen von *Toxorhynchites brevipalpis.* Diese Art wird im Rahmen der Stechmücken-Kontrolle eingesetzt; ihre Larven sind räuberisch, sie ernähren sich von anderen Stechmückenarten. *Toxorhynchites brevipalpis* selbst gehört zu den Toxorhynchitinae, und dies wiederum ist eine Unterfamilie der Stechmücken, der Culicidae.


Das Johnston'sche Organ in der Antennenbasis dient Stechmücken-Männchen als Hörorgan; rechts: histologischer Längsschnitt.

MARTIN GÖPFERT UND DANIEL ROBERT

Errata

Auf leisen Flügeln – Wissenschaft in Unternehmen, August 2002

Bei dem Bildnachweis auf Seite 88 muss es richtig heißen: H. Großbongardt; auf Seite 89 unten: DLR.

Der Staubring unserer Sonne – Forschung aktuell, Juli 2002

Der Bahnradius des Saturns wurde auf Seite 17 falsch angegeben. Er beträgt aufgerundet 10 AE.

Die Redaktion

Spektrum DER WISSENSCHAFT

Chefredakteur: Dr. habil. Reinhard Breuer (v.i.S.d.P.)
Stellvertretende Chefredakteure: Dr. Inge Hoefer (Sonderhefte), Dr. Gerhard Trageser
Redaktion: Dr. Klaus-Dieter Linsmeier, Dr. Christoph Pöppe (Online Coordinator), Dr. Uwe Reichert, Dr. Adelheid Stahnke; E-Mail: redaktion@spektrum.com
Ständiger Mitarbeiter: Dr. Michael Springer
Schlussredaktion: Katharina Werle, Christina Peiberg
Bildredaktion: Alice Krüßmann
Art Direction: Karsten Kramarczik
Layout: Sibylle Franz, Natalie Schäfer, Andreas Merkert (stv. Hersteller)
Redaktionsassistenz: Eva Kahlmann, Ursula Wessels
Redaktionsanschrift: Postfach 104840, 69038 Heidelberg Tel. (0 62 21) 91 26-711, Fax (0 62 21) 91 26-729
Büro Bonn: G. Hartmut Altenmüller, Tel. (0 22 44) 43 03, Fax (0 22 44) 63 83, E-Mail: ghalt@aol.com
Korrespondenten: Dieter Beste, Marion Kälke, Tel. (02 11) 908 3357, Fax (02 11) 908 33 58, E-Mail: Dieter.Beste@t-online.de
Produktentwicklung: Dr. Carsten Könneker, Tel. (0 62 21) 91 26-770
Herstellung: Natalie Schäfer, Tel. (0 62 21) 91 26-733
Marketing: Annette Baumbusch (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-741, E-Mail: marketing@spektrum.com
Einzelverkauf: Anke Walter (Ltg.), Tel. (0 62 21) 91 26-744
Übersetzer: An diesem Heft wirkten mit: Henri Carnal, Daniel Fischer, Dr. Olaf Fritsche, PD Dr. Udo Gansloßer, Dr. Olivia Meyer-Spring.

Verlag: Spektrum der Wissenschaft, Verlagsgesellschaft mbH, Postfach 104840, 69038 Heidelberg; Hausanschrift: Slevogtstraße 3–5, 69126 Heidelberg, Tel. (0 62 21) 91 26-600, Fax (0 62 21) 91 26-751
Geschäftsleitung: Dean Sanderson, Markus Bossle
Leser-Service: Marianne Blume, Tel. (0 62 21) 91 26-743, E-Mail: marketing@spektrum.com
Vertrieb und Abonnementverwaltung: Spektrum der Wissenschaft, Boschstraße 12, 69469 Weinheim, Tel. (0 62 01) 60 61 50, Fax (0 62 01) 60 61 94
Bezugspreise: Einzelheft € 6,90/sFr 13,50; im Abonnement € 75,60 für 12 Hefte; für Studenten (gegen Studiennachweis) € 65,40. Die Preise beinhalten € 6,00 Versandkosten. Bei Versand ins Ausland fallen € 6,00 Porto-Mehrkosten an. Zahlung sofort nach Rechnungserhalt. Konten: Deutsche Bank, Weinheim, 58 36 43 202 (BLZ 670 700 10); Postbank Karlsruhe 13 34 72 759 (BLZ 660 100 75)
Anzeigen: GWP media-marketing, Verlagsgruppe Handelsblatt GmbH; Bereichsleitung Anzeigen: Harald Wahls; Anzeigenleitung: Holger Grossmann, Tel. (02 11) 887-23 79, Fax (02 11) 887-23 99 verantwortlich für Anzeigen: Stefan Söht, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 887-23 86, Fax (02 11) 887-28 46
Anzeigenvertretung: Berlin-West: Rainer W. Stengel, Lebuser Str. 13, 10243 Berlin, Tel. (0 30) 7 74 45 16, Fax (0 30) 7 74 66 75; Berlin-Ost: Dirk Schaeffer, Friedrichstraße 150–152, 10117 Berlin, Tel. (030) 6 16 86-150, Fax (0 30) 6 15 90 05, Telex 114810; Hamburg: Michael Scheible, Stefan Irmler, Burchardstraße 17, 20095 Hamburg, Tel. (0 40) 30 18 31 94, Fax (0 40) 33 90 90; Düsseldorf: Cornelia Koch, Klaus-P. Barth, Werner Beyer, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Postfach 10 26 63, 40017 Düsseldorf, Tel. (02 11) 3 01 35-20 50, Fax (02 11) 1 33 97 4; Frankfurt: Anette Kullmann, Annelore Hehemann, Holger Schlitter, Große Eschenheimer Straße 16–18, 60313 Frankfurt am Main, Tel. (0 69) 92 01 92 82, Fax (0 69) 92 01 92 88; Stuttgart: Norbert Niederhof, Königstraße 20, 70173 Stuttgart, Tel. (0711) 22 475 40, Fax (07 11) 22 475 49; München: Reinold Kassel, Karl-Heinz Pfund, Josephspitalstraße 15, 80331 München, Tel. (0 89) 54 59 07-12, Fax (0 89) 54 59 07-16
Druckunterlagen an: GWP-Anzeigen, Vermerk: Spektrum der Wissenschaft, Kasernenstraße 67, 40213 Düsseldorf, Tel. (02 11) 8 87-23 87, Fax (02 11) 37 49 55
Anzeigenpreise: Gültig ist die Preisliste Nr. 23 ab 01.01.2002.
Gesamtherstellung: VOD – Vereinigte Offsetdruckereien GmbH, D-69214 Eppelheim

ISSN 0170-2971

Ein Teil unserer Auflage enthält eine Beilage von Weltbild Verlag, Augsburg; National Geographic, Hamburg; Gruner & Jahr, Hamburg; Deutsche Verlagsanstalt, Stuttgart; Financial Times Deutschland, Düsseldorf. Wir bitten unsere Leser um Beachtung.

SCIENTIFIC AMERICAN
415 Madison Avenue, New York, NY 10017-1111
Editor in Chief: John Rennie, Publisher: Bruce Brandfon, Associate Publishers: William Sherman (Production), Lorraine Leib Terlecki (Circulation), Chairman: Rolf Grisebach, President and Chief Executive Officer: Gretchen G. Teichgraeber, Vice President: Frances Newburg

JEAN RENÉ CHATILLION

PLANETEN

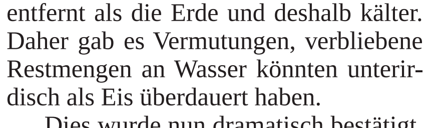
Gefrorener Ozean unter dem Marsboden

Die Marssonde Odyssey entdeckte riesige Wasservorkommen auf dem Roten Planeten. Im Umkreis des Südpols befindet sich ab einem halben Meter Tiefe ein Gemenge aus Staub und Eis.

Von Thilo Körkel

Der Mars ist eine öde Stein- und Staubwüste. Und doch muss es auf ihm einmal größere Mengen an fließendem Wasser gegeben haben. Dafür sprechen sowohl theoretische Überlegungen als auch anders schwer erklärbare Oberflächenstrukturen. So weist der Rote Planet Canyons, Erosionsrinnen und Schwemmfächer auf, wie sie auf der Erde nur durch Wasser hervorgerufen werden. Doch wo ist das flüssige Nass geblieben?

Einer gängigen Vorstellung zufolge hat der Mars früh sein einst beachtliches Wasservorkommen und seine ursprüngliche Atmosphäre verloren. Begünstigt wurde diese Umweltkatastrophe dadurch, dass unser Nachbarplanet Gase und Wasserdampf schlecht festhalten kann, weil er nur etwa ein Zehntel der Masse der Erde sowie ein Drittel ihrer Schwerkraft hat. Außerdem ist er weiter von der Sonne



entfernt als die Erde und deshalb kälter. Daher gab es Vermutungen, verbliebene Restmengen an Wasser könnten unterirdisch als Eis überdauert haben.

Dies wurde nun dramatisch bestätigt. Die jüngsten Daten der Nasa-Sonde „2001 Mars Odyssey“ lassen darauf schließen, dass dicht unterhalb des Marsbodens gewaltige Mengen gefrorenen Wassers lagern. Noch am 1. März, als erste Vorab-Ergebnisse des Gamma Ray Spektrometers (GRS) an Bord der Sonde publiziert wurden, war das internationale Forscherteam um William V. Boynton vom Lunar and Planetary Laboratory der Universität von Arizona in Tucson nur von wenigen Prozent Wasserstoffanteil im Boden ausgegangen.

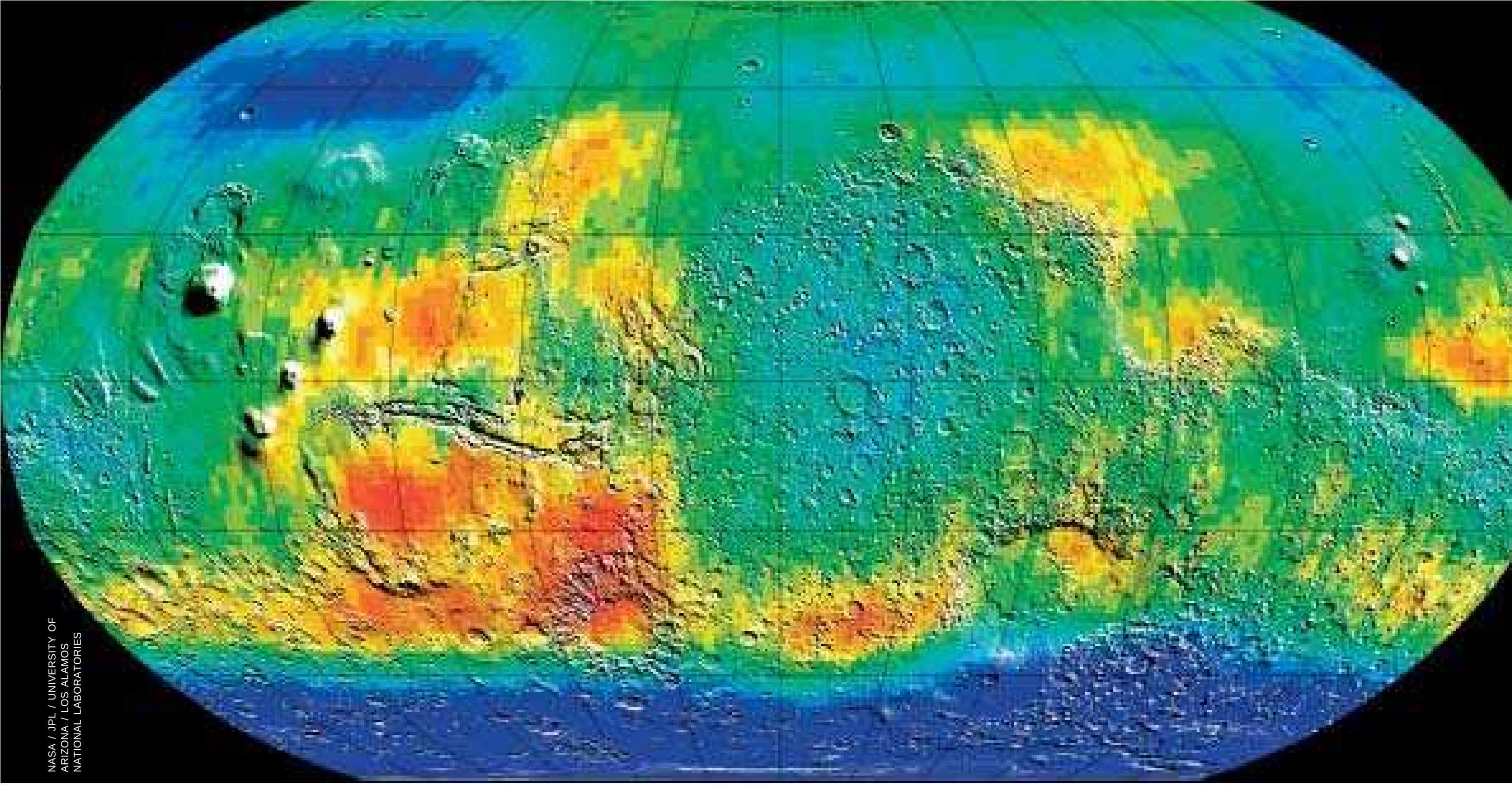
Doch nun musste es die früheren Schätzungen drastisch nach oben revidieren: Ab dem 60. Breitengrad der Südhalbkugel entdeckten die Forscher bis hin zum Pol eine unterirdische Schicht, in der Eis – mit einem Volumenanteil von über fünfzig Prozent – mit Marsstaub vermischt ist. Mit diesen Vorkommen könne man zweimal den Lake Michigan auffüllen, meldete das Jet Propulsion Laboratory in Pasadena (Kalifornien), das im Auftrag der Nasa für die Odyssey-Mission verantwortlich zeichnet. Allerdings erfassen die Messungen nur den obersten Meter der Marsoberfläche. Wenn die Eisschicht, wie vermutet, tiefer hinabreicht, wäre die Wassermenge noch um ein Vielfaches höher.

Am 7. April vergangenen Jahres vom Kennedy Space Center gestartet, erreichte die Odyssey-Sonde am 23. Oktober 2001 ihre Umlaufbahn. Das GRS nahm im Februar seine Arbeit auf. Gemeinsam mit anderen Instrumenten an Bord soll es die Vorkommen einer Reihe von Elementen auf der Marsoberfläche erkunden und die jahreszeitlichen Veränderungen der Polkappen messen. Ziel ist, die Entstehungsgeschichte des Roten Planeten immer genauer rekonstruieren zu können.

Ungeachtet der schon Ende Mai publizierten Ergebnisse erlangte die Sonde erst am 4. Juni ihre volle Einsatzfähigkeit. An diesem Tag wurde der über sechs Meter lange Ausleger für das Gammaspektrometer ausgeklappt, eines der drei Instrumente des GRS. Vorher befand es sich in der Nähe des Raumschiffs und registrierte folglich die von diesem ausgehende Hintergrundstrahlung. Nun, in größerem Abstand, verringert sich der Störeffekt, und die Messungen werden

NASA / JPL / UNIVERSITY OF ARIZONA / LOS ALAMOS NATIONAL LABORATORIES

Mit künstlerischer Fantasie gesehen: Die Marssonde Odyssey entdeckt eine Eisschicht unter der Oberfläche des Roten Planeten.



Auf Wasser im Marsboden deuten unter anderem die von Odyssey gemessenen Flüsse an mäßig schnellen (epithermischen) Neutronen. Ihre Intensitäten sind auf dieser topografischen Marskarte farbcodiert eingezeichnet und nehmen von blau über grün und gelb nach rot zu. Niedrige Werte (blau) zeigen Wasser bis in etwa einen Meter Tiefe an, da Wasserstoffatome mäßig schnelle und langsame Neutronen sehr wirksam einfangen.

präziser. Auch die Suche nach weiteren Elementen kann somit beginnen.

Etwas mehr als ein Marsjahr, nämlich rund zwei Erdjahre, werden die Wissenschaftler für die Messungen benötigen. Denn Gammaquanten, deren Energien eindeutige Signale für bestimmte Elemente sind, gibt es nur in relativ geringer Zahl. Außerdem absorbiert der Detektor – ein etwa 260 Kubikzentimeter großer hochreiner Germaniumkristall – lediglich einen Teil der energiereichen Strahlung. Und noch ein weiterer Faktor verlängert die Messzeit: Damit die Aufnahmen wegen der hohen Geschwindigkeit der Mars Odyssey von etwa 3,5 Kilometer pro Sekunde nicht verschmieren, müssen sie unterbelichtet werden. Erst wenn die Sonde viele Male dieselbe Fläche überflogen hat, fügen sich die Einzelaufnahmen zu einem aussagekräftigen Bild zusammen.

Boten aus dem Untergrund

Sehr viel günstiger ist die Situation bei den Neutronenflüssen, die von den anderen beiden Instrumenten des GRS registriert werden. Sie erlauben nach nur einer Woche schon umfangreiche Kartierungen der Marsoberfläche. Folglich lieferten sie auch als Erste Hinweise auf die unterirdischen Wasservorkommen.

Dass Neutronen und Gammaquanten überhaupt dazu dienen können, die Zusammensetzung der Marsoberfläche zu ermitteln, verdanken die Forscher einer Besonderheit des Roten Planeten: Die energiereiche kosmische Strahlung, die vor allem aus schnellen Protonen besteht, prallt fast ungehindert auf den Marsboden. Kein planetares Magnetfeld lenkt sie ab, und auch die dünne Atmosphäre, deren Druck mit zehn Millibar gerade einmal einem Hundertstel des irdischen Luftdrucks entspricht, stellt kein Hindernis für sie dar.

Bei ihrem Aufprall schlagen die kosmischen Strahlungsteilchen zunächst so genannte schnelle Neutronen aus Atomen im Marsboden heraus. Diese werden an anderen Atomen gestreut und so zu „epithermischen" und schließlich zu „thermischen" Neutronen abgebremst. Deren kinetische Energie entspricht dann nur noch der Wärmebewegung der umliegenden Materie. Wenn solche thermischen Neutronen von anderen Atomen eingefangen werden, heben sie diese in energetisch höhere Zustände an. Beim Zurückfallen in den Grundzustand werden dann Gammaquanten ganz bestimmter Energien ausgesandt. So liefert eine ausgeprägte Linie bei 2,223 Millionen Elektronenvolt in den Spektren der Odyssey einen klaren Hinweis auf Wasserstoff (H).

Um von ihm auf Wasser (oder Eis) zu schließen, sind allerdings weitere Überlegungen notwendig. Der zusätzliche Nachweis von Sauerstoff (O) wäre wenig aufschlussreich: Dieses Element kommt auch in jedem Felsbrocken mit einem Gewichtsanteil von vierzig bis fünfzig Prozent vor. Dennoch steht praktisch fest, dass die Wissenschaftler Wasser, also H_2O, gefunden haben. Die gemessenen Mengen an Wasserstoff wären allein damit, dass sich atomarer Wasserstoff oder beispielsweise OH-Ionen in Mineralien eingelagert haben, nicht zu erklären.

Zur Messung der Neutronenflüsse dienen ein Neutronenspektrometer und ein Neutronendetektor, die neben dem Gammadetektor Teil des GRS-Systems an Bord der Odyssey sind. Die beiden Geräte können zwischen schnellen, epithermischen und thermischen Neutronen unterscheiden.

Aber anders als aus der Energie von Gammaquanten lassen sich aus den Neutronenflüssen keine eindeutigen Signale für bestimmte Elemente ableiten. Aufschlussreich sind nur auffallende Änderungen beim Übergang von einer Marsregion zur anderen. So beginnt bei 60 Grad südlicher Breite ziemlich abrupt eine Zone, in der nur noch sehr wenig thermische und epithermische Neutronen auftreten.

Für die Wissenschaftler ist das ein zweifelsfreier Hinweis auf hohe Vorkommen von Wasserstoff. Dieser kann als guter „Moderator" Neutronen besonders wirksam abbremsen. Das liegt daran, dass seine Masse praktisch mit derjenigen der einfallenden Neutronen übereinstimmt. Unter diesen Umständen ist die Energieübertragung der schnellen Neutronen auf die langsamen Wasserstoffatome maximal. Die abgebremsten thermi- ▶

schen Neutronen fängt der Wasserstoff dann sehr effizient ein.

Das unterscheidet ihn von dem Kohlendioxid, das derzeit den Mars-Nordpol bedeckt, weil auf der Nordhalbkugel des Planeten noch Winter herrscht. Es bremst die Neutronen zwar gleichfalls ab, absorbiert sie anschließend aber nicht. Deshalb werden am Nordpol momentan mittlere Flüsse von epithermischen und sehr viele thermische Neutronen registriert. Wenn demnächst dort der Frühling beginnt, wird ab etwa –70 Grad Celsius die Kohlendioxid-Schicht verdunsten. Dann sollte sich zeigen, ob auf der Nordhalbkugel ähnlich viel Eis lagert wie im Süden.

Die neuen Befunde passen auch gut zu früheren theoretischen Abschätzungen. Andere Forscher hatten ein Gebiet auf dem Mars ausgemacht, in dem die Temperaturen niedrig genug sind, dass Eis unterirdisch für Jahrmillionen überdauern kann. Es stimmt sehr genau mit der Region überein, in der nun die Odyssey-Sonde Wasserstoff entdeckt hat.

Trotz des unterirdischen Eisozeans bleibt der Mars eine Wüste. Flüssiges Wasser an seiner Oberfläche würde bei dem herrschenden niedrigen Atmosphärendruck verdunsten. Selbst das Eis hält sich, zumindest in einiger Entfernung von den Polen, nur in einer gewissen Tiefe.

Mit Hilfe von Modellrechnungen erschlossen die Forscher den Aufbau des Marsbodens. Demnach gliedert er sich jenseits 60 Grad südlicher Breite in zwei Schichten. Die obere ist lediglich einige Dezimeter dick und hat einen Wasseranteil von nur rund einem Prozent. Das Wasser ist vermutlich in Mineralien gebunden. Die untere Schicht besteht dagegen aus einer Mischung von Marsstaub und Eis. Dessen Anteil nimmt zum Südpol hin von etwa dreißig auf rund sechzig Gewichtsprozent zu; zugleich rückt die Eis führende Schicht näher an die Oberfläche heran.

Wie der Boden in größerer Tiefe aussieht, ist allerdings noch unbekannt: Neutronen blicken maximal bis etwa ein oder zwei Meter unter die Oberfläche, und Gammastrahlen liefern sogar nur Informationen über die obersten dreißig bis fünfzig Zentimeter. Diese Beschränkung wird erst die europäische Mars Express Mission aufheben, die frühestens 2004 den Mars mit Hilfe von Radar einige Kilometer tief durchleuchten soll.

Jetzt sind erst einmal die alltäglichen Probleme mit der Odyssey-Sonde zu bewältigen. Nach Auskunft von Johannes Brückner, Physiker in der Abteilung Kosmochemie des Max-Planck-Instituts für Chemie in Mainz und Spezialist für Gammastrahlung im GRS-Team, stand der Germaniumkristall während des Hinflugs zum Mars unter unerwartet schwerem Beschuss durch Partikel aus Sonneneruptionen. Dadurch entstanden Störungen im Kristallgitter, welche die Energieauflösung des Detektors verschlechtern. Durch Aufheizen auf bis zu 100 Grad Celsius, ein von Brückner mitentwickeltes Verfahren, könnten die Germaniumatome dazu gebracht werden, wieder ihre regelmäßige Anordnung anzunehmen. Die Technik an Bord der Odyssey hat jedoch eine Tücke: Wegen Wärmeverlusts lässt sich der Kristall nur auf 75 Grad Celsius erwärmen. So bleibt sein Ausheilen unvollständig. Inwieweit das die Messergebnisse beeinträchtigen wird, bleibt abzuwarten. ■

Thilo Körkel *ist Diplom-Physiker und freier Journalist in Frankfurt.*

SUPERCOMPUTER

Die Simulation der ganzen Welt

Seit April ist in Japan ein Supercomputer in Betrieb, der ob seiner gigantischen Rechenleistung die amerikanische Konkurrenz das Fürchten lehrt.

Von Christoph Pöppe

Die USA sind schwer gedemütigt: Eine fremde Nation hat ihnen auf ihrem ureigensten Feld, der Hochtechnologie, den Rang abgelaufen. Der leistungsstärkste Computer der Welt steht seit diesem Frühjahr nicht mehr wie bisher noch stets auf ihrem Territorium, sondern in Japan. Und er ist seinen Konkurrenten nicht etwa nur knapp, sondern haushoch überlegen: Der „Earth Simulator“, betrieben vom Zentrum für Meereswissenschaft und -technik (*Japan Marine Science and Technology Center*, Jamstec), rechnet mit 35 Teraflops (35 Billionen Rechenoperationen pro Sekunde) fünfmal so schnell wie der bisherige Spitzenreiter „ASCI White“ vom Lawrence-Livermore-Nationallaboratorium in Livermore (Kalifornien) oder so schnell wie die Nummern 2 bis 20 der Weltrangliste zusammen.

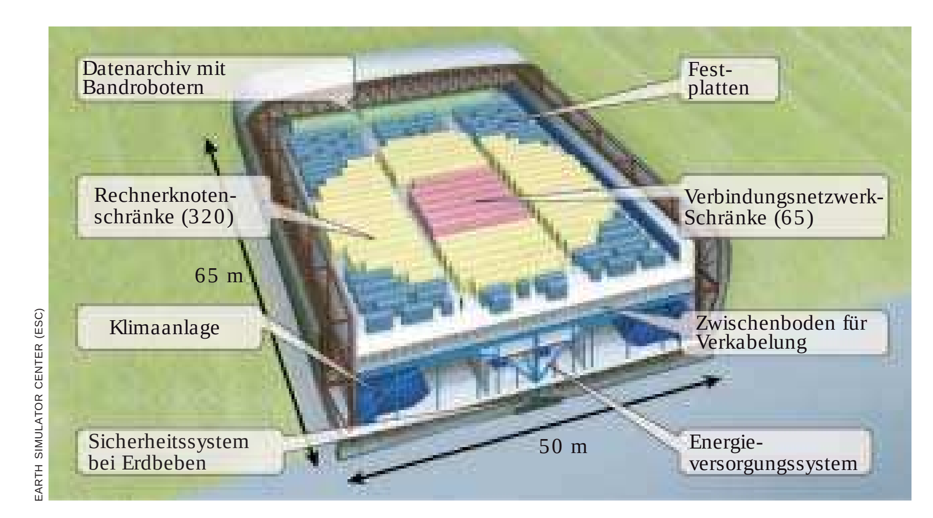
Während der vergangenen Jahrzehnte folgte die Leistung des jeweils stärksten Rechners, auf einer logarithmischen Skala über der Zeit aufgetragen, annähernd einer Geraden – ein Zusammenhang, der als Moore’sches Gesetz berühmt geworden ist. Diese Kurve hat jetzt einen kräftigen Knick nach oben bekommen.

Jack Dongarra von der Universität von Tennessee, der gemeinsam mit anderen die Weltrangliste der 500 schnellsten Computer führt, ging in einem Artikel in der „New York Times“ so weit, von einem „Computenik-Schock“ zu sprechen – in Anspielung auf den Sputnik-Schock, den die Sowjetunion mit dem Start des ersten Raumflugkörpers 1957 den USA ▶



EARTH SIMULATOR CENTER (ESC)

Die geballte Rechenkraft des „Earth Simulator“ verbirgt sich in Reihen von Schränken.



EARTH SIMULATOR CENTER (ESC)

Der weltweit schnellste Computer namens Earth Simulator steht in einer 50 mal 75 Meter großen Halle in Yokohama. Die Prozessoren in den 65 Metallbehältern in der Mitte sorgen für die Datenübertragung zwischen den 5120 Rechnern in den 320 ringförmig um sie angeordneten Schränken. Ganz außen sind die Festplattenspeicher untergebracht.

versetzt hatte. Der Vergleich hinkt freilich, denn von einer Überraschung kann diesmal keine Rede sein. Planung und Bau des Earth Simulator spielten sich in aller Öffentlichkeit ab. Im Juni 2001 wurde das 1997 gestartete Projekt auf der alljährlichen Supercomputer-Konferenz in Heidelberg in allen Einzelheiten vorgestellt. Und als Jamstec-Chef Tetsuya Sato auf der diesjährigen Tagung über die ersten Ergebnisse berichtete, gab es jenseits aller nationalen Rivalität ehrlichen Beifall auf offener Bühne.

Vermutlich wollte Dongarra mit seiner zugespitzten Formulierung denn auch nur erreichen, dass die Geldquellen ähnlich munter sprudeln wie damals nach dem Sputnik-Schock. Immerhin haben es die japanischen Erbauer des Earth Simulator fertig gebracht, ihrer Regierung eine für zivile Zwecke außergewöhnlich hohe Geldsumme zu entlocken.

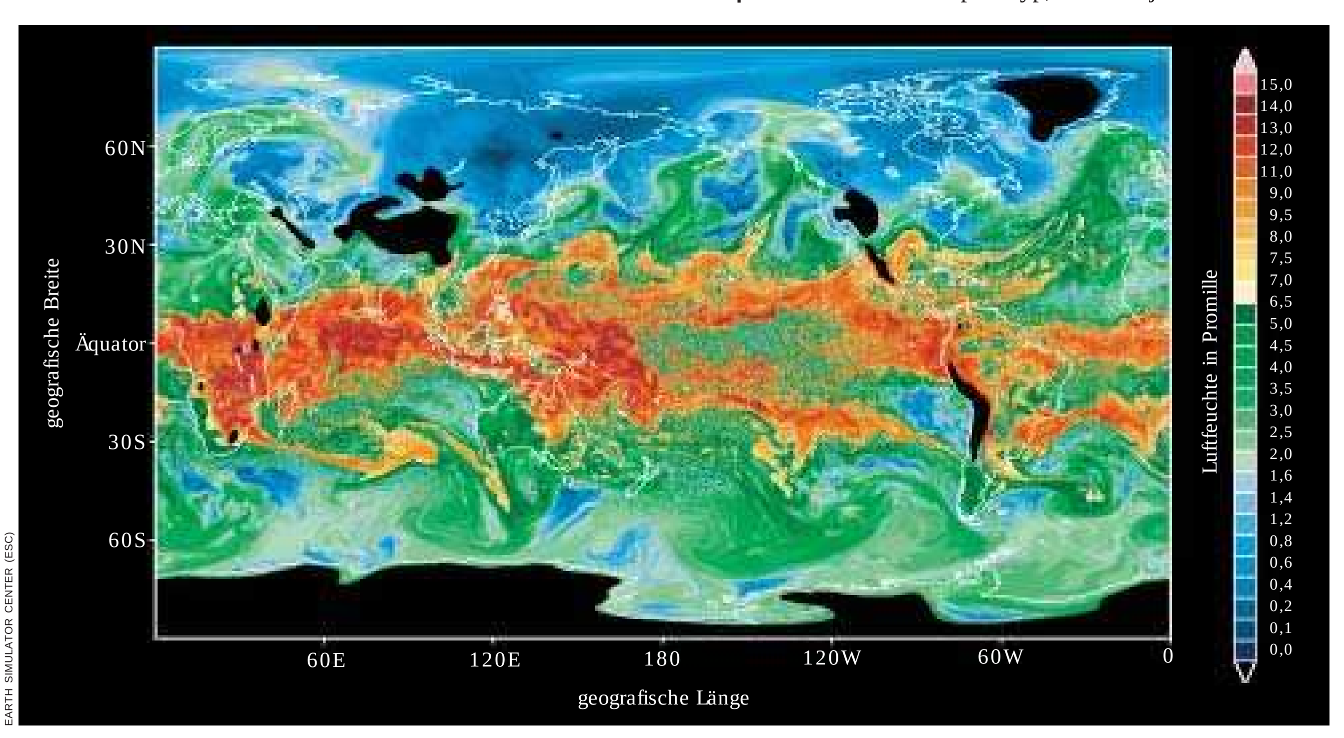
Rohe Rechenleistung ist dank der Massenproduktion an standardisierten Mikroprozessoren („Chips") heutzutage vergleichsweise wohlfeil zu haben. Aus Kostengründen sind die Konstrukteure von Hochleistungsrechnern sogar davon abgekommen, die benötigten Chips eigens entwerfen zu lassen. Was bringt ein Prozessor mit – sagen wir – der zehnfachen Leistung, wenn er wegen der geringen Stückzahl hundertmal so viel kostet? Man kompensiert durch Masse, was dem einzelnen Chip an Geschwindigkeit fehlt, und kann sich im Extremfall sogar mit Material aus Schrott-PCs zufrieden geben (siehe Spektrum der Wissenschaft 03/2002, Seite 88).

Allerdings muss ein solcher massivparalleler Rechner betrieben werden wie eine Manufaktur, die sämtliche Aufgaben von Tagelöhnern in Heimarbeit erledigen lässt. Rohware abholen und Fertigware anliefern kostet zwar Zeit, aber das fällt nicht besonders ins Gewicht, weil der Heimarbeiter an einem Werkstück eine ganze Weile allein zu tun hat – und Tagelöhner sind billig!

Nur ist es nicht immer möglich oder zweckmäßig, eine große Aufgabe in kleine, arbeitsintensive Portionen zu zerlegen. Vor allem aber sind die Tagelöhner in den letzten Jahren zwar mit dem Arbeiten geradezu atemberaubend schneller geworden, aber nicht mit dem Holen und Liefern: Die Geschwindigkeiten für die Datenübertragung unter Prozessoren und für den Speicherzugriff haben mit dem dramatisch angestiegenen Rechentempo nicht Schritt gehalten.

Deshalb ist beim Earth Simulator ein Computertyp, der seit jeher eine Stärke ▶

Mit seiner geballten Rechenkapazität kann der Earth Simulator beispielsweise die Luftfeuchtigkeit weltweit mit einer Auflösung von 10,4 Kilometern berechnen – hier für eine Höhe von 1500 Metern und einen Luftdruck von 850 Hektopascal.



EARTH SIMULATOR CENTER (ESC)

 (Seiten 17, 18, 19 und 20: Anzeige und Beihefter)

japanischer Hersteller war, aber eigentlich überholt schien, unerwartet zu neuen Ehren gekommen: der so genannte Vektorrechner. Statt Tagelöhnern in Heimarbeit beschäftigt er gleichsam Tausende von Fließbandsklaven damit, auf ein zentrales Kommando sehr einfache, kleine Handgriffe zu tun. Ein einziger Prozessortakt vergeht, und schon haben tausend Rechenknechte je zwei Zahlen multipliziert. In den nächsten Takten wird die Summe all dieser Produkte gebildet und mit ihr (dem „Skalarprodukt zweier Vektoren“) weitergearbeitet. Ein Vektorrechner ist einem Verbund aus Einzelprozessoren weit überlegen, wenn die Aufgabe im Wesentlichen aus den geschilderten sehr einfachen Tätigkeiten besteht.

Das trifft auf den Earth Simulator zu. Seinem Namen getreu soll er nichts weniger simulieren als die ganze Erde; gemeint sind einerseits Wetter und Klima für den gesamten Globus einschließlich der Temperaturen von Land- und Meeresoberfläche, andererseits die Bewegungen der Erdkruste – für Japan ein Thema von besonderem Interesse.

Die ganze Erde im Netz

Wie üblich werden für diese Berechnungen gedachte Netze auf die Erdoberfläche und in den Luftraum darüber gelegt. Vorgänge wie Erwärmung, Verdunstung oder Luftbewegung erfasst der Computer nicht für jeden Punkt der Atmosphäre (was ohnehin unmöglich wäre), sondern ersatzweise für jeden Netzknoten. Aus dem gegebenen Zustand des ganzen Netzes berechnet er denjenigen zu einem etwas späteren Zeitpunkt, daraus den nächsten und so weiter.

Neu am Earth Simulator ist die Anzahl der Knoten: Mit einer typischen Gitterweite von rund zehn Kilometern (einem zehntel Grad) in der Horizontalen und 54 Stockwerken ist sein Netz um eine ganze Größenordnung engmaschiger als alles, was bisher zur globalen Wettersimulation diente. Damit gehen ihm auch lokale Phänomene wie Taifune oder die besonderen meteorologischen Verhältnisse in engen Gebirgstälern nicht mehr durch die Maschen.

Beim Wetter hängt alles mit allem zusammen: Jeder Knoten beeinflusst auf die Dauer jeden anderen. Wie kann man dem in der Simulation Rechnung tragen?

Wenn man der Einfachheit halber jeden Knoten nur auf seine unmittelbaren Nachbarn einwirken lässt, stellen sich die Fernwirkungen erst nach und nach ein. Deshalb muss man möglichst kleine Zeitschritte wählen, um ein realistisches Ergebnis zu erhalten. Dieses „explizite” Verfahren eignet sich für das Parallelrechnen, weil es erlaubt, jedem Heimarbeiter ein begrenztes Teilgebiet der Erdoberfläche zur Bearbeitung zuzuweisen.

Die Alternative ist, alle unbekannten Werte in ein großes Gleichungssystem zu schreiben und dieses nach sämtlichen Unbekannten zugleich aufzulösen. Bei diesem „impliziten“ Verfahren werden die Fernwirkungen direkt berücksichtigt, sodass man die Zeitschritte weit größer wählen kann als bei der expliziten Variante. Diese Vorgehensweise ist wie geschaffen für die Vektorverarbeitung; denn der aufwendigste Teil der Arbeit bei der Lösung großer Gleichungssysteme besteht in der Berechnung von Skalarprodukten.

Bei einem feinmaschigen Netz über der ganzen Erde übersteigt die Anzahl solcher Berechnungen allerdings selbst die Kapazitäten eines Vektorrechners. Deswegen arbeiten im Earth Simulator 5120 Vektorprozessoren der Firma NEC zusammen und bilden einen Parallelrechner aus Vektor-Komponenten. Durch geschickte Auslegung der Einzelteile, vor allem der Kommunikationshardware, und die Beschränkung auf einen speziellen Verfahrenstyp gelingt es den Betreibern, die Prozessoren zu ungefähr 85 Prozent der Zeit tatsächlich zu beschäftigen, was für einen Parallelrechner ein sensationell guter Wert ist. Auf diese Weise konnte der Earth Simulator, wie Sato in seinem Vortrag berichtete, bereits mit einem Viertel seiner Kapazität die weltweite Temperaturverteilung der Ozeane in guter Näherung an die Realität für ein ganzes Jahr aus den Anfangsdaten berechnen.

Der Grobaufbau des Systems spiegelt seine Funktionsweise durchaus sinnfällig wider. In der Mitte der 50 mal 75 Meter messenden Halle stehen 65 kleiderschrankgroße Behälter für Prozessoren, die nichts weiter tun, als Daten zwischen den eigentlichen Rechnern hin- und herzuleiten. Letztere stecken in 320 Schränken, die die Kommunikationsprozessoren ringförmig umgeben. Weitere Schränke ganz außen beherbergen den ebenfalls reichlich bemessenen Speicher.

Unmittelbar nach Satos Vortrag beeilte sich Dona Crawford, die Chefin der Rechnerabteilung von Lawrence Livermore, in ihrem Konferenzbeitrag schon für 2004 einen Rechner namens Blue Gene anzukündigen, der den Earth Simulator an Geschwindigkeit noch übertreffen soll. Allzu lange können die Amerikaner die Schande, bei Supercomputern nicht die Ersten zu sein, eben nicht auf sich sitzen lassen. ■

Christoph Pöppe *ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.*

KLIMAFORSCHUNG

Eisige Bohrung in Tibets Klima-Archiv

Trotz widriger Umstände konnten Berliner Forscher Bohrkerne aus einem See in Tibet gewinnen. Sie bergen Zeugnisse der Klimageschichte einer Region, die sehr stark auf Änderungen der Windzirkulationssysteme der Nordhalbkugel reagiert.

Von Ulrike Herzschuh und Steffen Mischke

Vor Kälte zitternd, aber erwartungsvoll standen wir im eisigen Wind des tibetischen Hochplateaus mitten auf einem zugefrorenen See und beobachteten, wie der Schlaghammer das Bohrgestänge – mit dem Bohrer an der Spitze – durch ein Loch in der Eisdecke in den Boden trieb. Doch nach nur drei Metern ging es nicht mehr weiter. Der Bohrer war auf ein Gemisch aus Sand und Kies gestoßen, das wegen seiner stärkeren Reibung eine fast undurchdringliche Schicht bildete. Damit drohte unser Unternehmen schon kurz nach seinem Beginn zu scheitern. Wir waren gekommen, um Sedimente vom Grund des Sees zu erbohren. Sie sollten uns helfen, die Klimageschichte Zentralasiens besser zu verstehen.

Diese Region ist deshalb so interessant, weil sie an der Grenze zwischen der Westwindzone (zu der auch Mitteleuropa gehört) und dem asiatischen Sommermonsun liegt. Dadurch reagiert sie besonders empfindlich auf Veränderungen der Windzirkulationssysteme auf der Nordhalbkugel. Schon seit mehr als zehn Jahren erforschen daher Geowissenschaftler der Freien Universität Berlin die Klimageschichte Tibets, seit zwei Jahren koordiniert vom Interdisziplinären Zentrum für Ökosystemdynamik in Zentralasien unter Leitung von Frank Riedel.

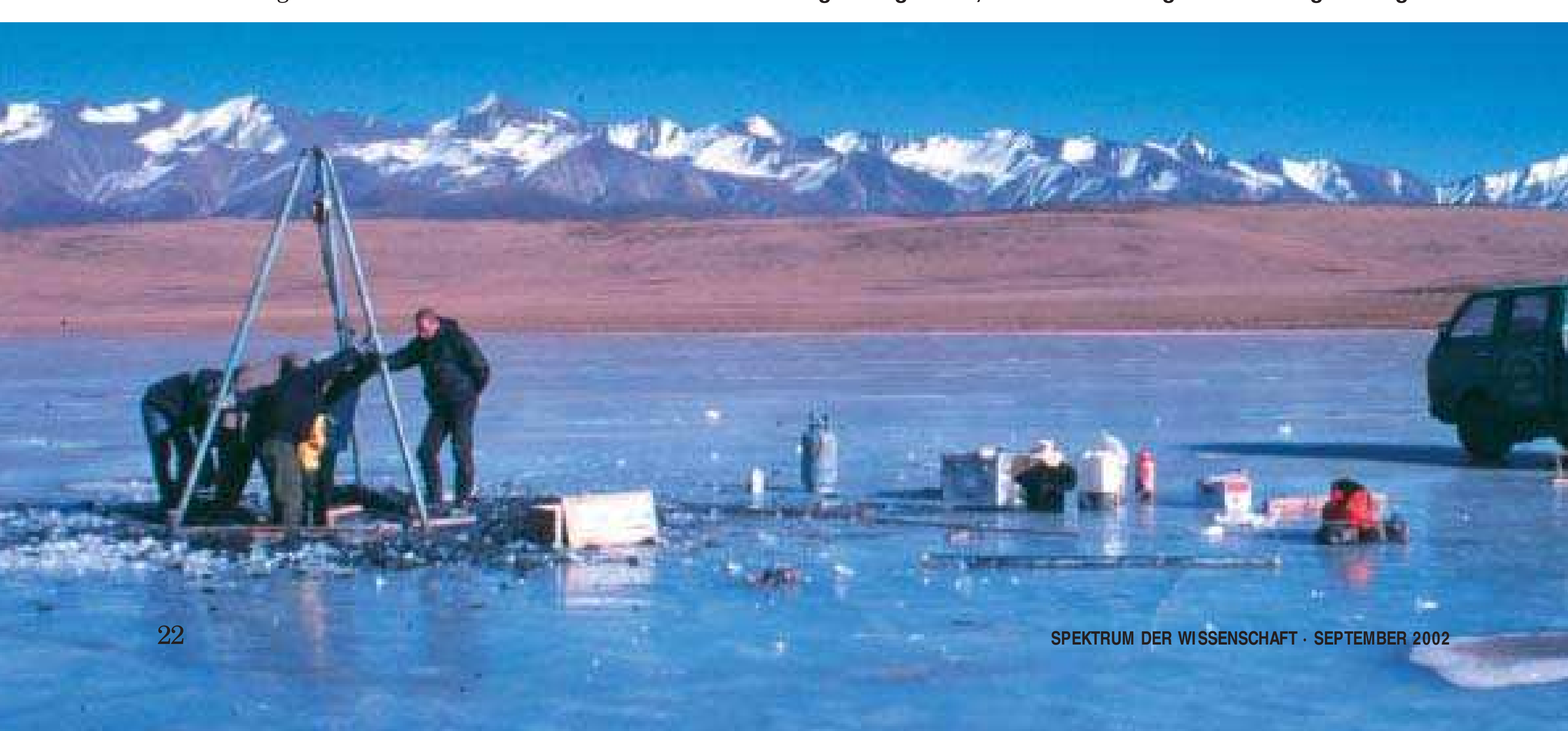
Entscheidende Aufschlüsse versprechen dabei Ablagerungen am Grunde von Seen, die sich im Laufe der Jahrtausende zu mehrere Meter mächtigen Sedimenten aufgeschichtet haben. Sie enthalten in erster Linie ausgefällte anorganische Carbonate, daneben aber auch Reste von Mikroorganismen wie Muschelkrebsen oder Larven von Zuckmücken sowie von eingewehtem Pollen der umgebenden Vegetation. Auf diese Weise archivieren sie über viele Jahrtausende hinweg Zeugnisse der Umweltbedingungen und des Klimas in der betreffenden Region.

Wir wollten daher möglichst tief in die Sedimentschicht vordringen, um weit in die Vergangenheit zurückblicken zu können. Dass nach nur drei Metern nichts als Sand und Kies zu Tage kam, war ein Schock. Denn es konnte heißen, dass wir bereits an der Untergrenze der Sedimentschicht angekommen waren. Der See hätte dann noch nicht lange existiert und schwerlich als weit zurückreichender Klimazeuge getaugt. Sollten wir trotzdem weiterbohren – in der Hoffnung, unter der Kiesschicht könne sich weiteres brauchbares Material verbergen?

Unser Untersuchungsgebiet waren die bis 6000 Meter aufragenden Qilian-Berge am Nordost-Rand des Tibet-Plateaus in Nordwest-China. Wir hatten uns diesen See ausgesucht, weil er auf 3200 Meter Höhe an der klimatisch sensiblen Baumgrenze liegt und mit einem sehr kleinen Einzugsgebiet ein relativ leicht verständliches, modellhaftes Ökosystem darstellt. In den Qilian-Bergen leben überwiegend Tibeter und Mongolen sowie die Uiguren, ein arabischstämmiges Volk islamischen Glaubens. Die meisten Bewohner sind Halbnomaden mit festen Behausungen in den Tälern für den Winter. Im Sommer ziehen sie mit den Yak-Herden auf die Hochweiden.

Expedition in die Einöde

Die Expedition in ein derart entlegenes Gebiet fernab großer Städte und Verkehrswege stellte uns vor große Herausforderungen. Da war zum einen die Kälte des Hochgebirges im Januar: Den Zeitpunkt im tiefen Winter hatten wir gewählt, um das schwere Bohrgerät auf der Eisdecke des Sees errichten zu können – im Sommer hätte man auf schwankenden Booten oder Pontons operieren müssen,



Aus einem kleinen See auf 3200 Meter Höhe in den über 6000 Meter hohen Qilian-Bergen am Nordost-Rand des Tibet-Plateaus wurden Sedimente erbohrt, in denen die Klimageschichte der letzten 18 000 Jahre archiviert ist. Die Eisdecke im Winter bot die einfachste und billigste Möglichkeit, das schwere Bohrgerät in Stellung zu bringen.

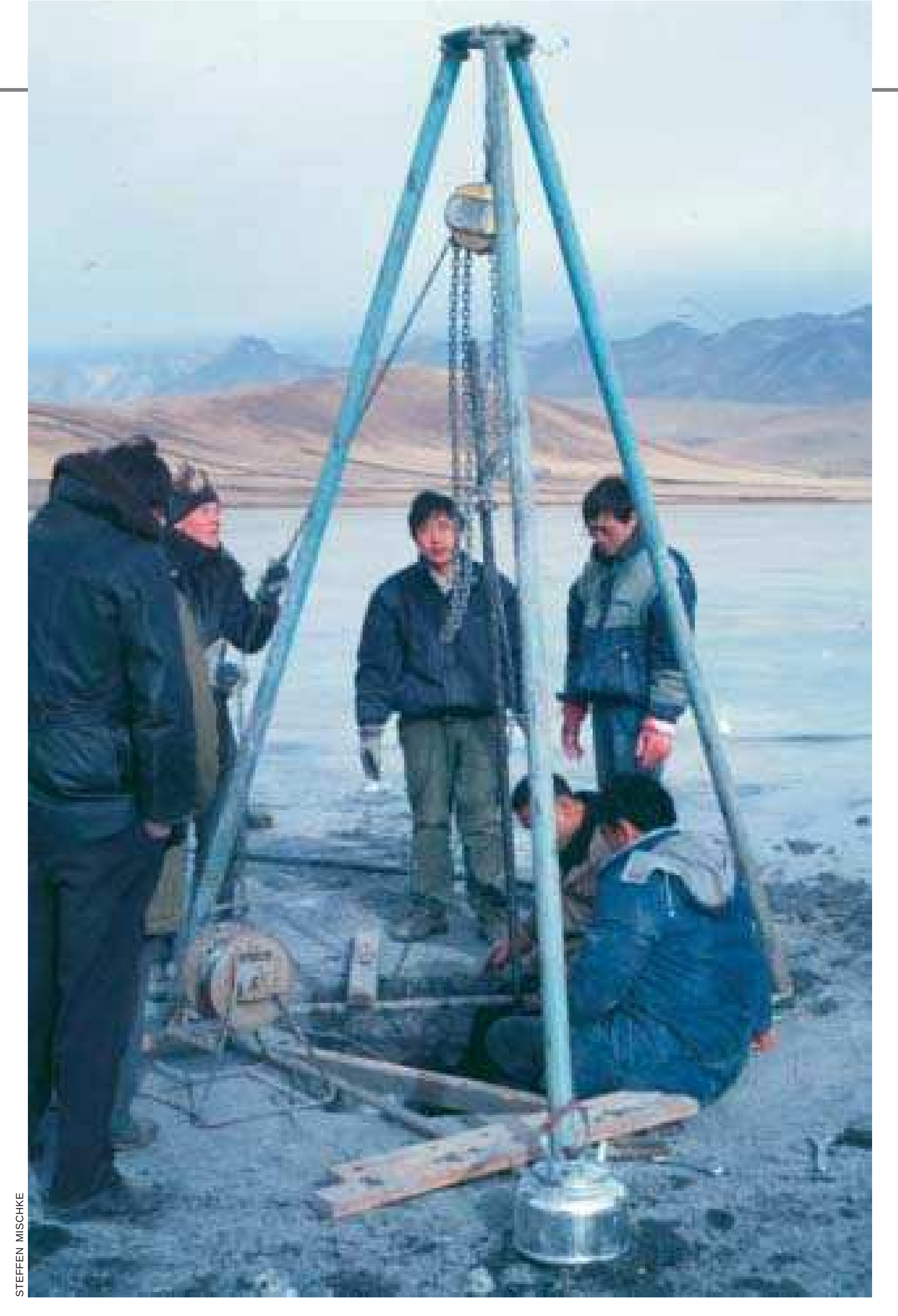
was neben erheblichen Schwierigkeiten beim Bohren auch beträchtliche Mehrkosten bedeutet hätte. Dafür mussten wir nun Temperaturen unter –10 Grad Celsius in Kauf nehmen. Die Kälte erlaubte ein Arbeiten nur während der Sonnenscheinstunden und setzte auch das Material erheblichen Belastungen aus. So fror die Ziehvorrichtung des Bohrgerätes in den bitterkalten Morgenstunden regelmäßig ein und wir mussten warten, bis die Sonne sie gegen Mittag enteiste.

Als der Bohrer auf den Kies traf, entschieden wir nach kurzer Beratung, noch nicht gleich aufzugeben und zu versuchen, durch die Kiesschicht hindurchzustoßen. Unter großer Kraftanstrengung wurde der Bohrer millimeterweise vorangetrieben. Dabei nahm allerdings der Schlagkopf Schaden. Was tun?

Die Handwerker eines fünfzig Kilometer entfernten Dorfes, der nächstgelegenen menschlichen Ansiedlung, boten die einzige – minimale – Chance auf eine Reparatur. Eine Verständigung war freilich nur mit improvisierten Handskizzen und Zeichensprache möglich; denn auch die chinesischen Kollegen sprachen kein uigurisch, und die Handwerker ihrerseits kaum chinesisch. Trotz der eingeschränkten Kommunikation gelang es einem Schmied aus dem Volk der Uiguren jedoch, ein neues Verbindungsstück zum Schlagkopf zu drehen.

Die Anstrengungen wurden belohnt. Nach einigen Stunden folgten auf die Sand- und Kiesschicht wieder feinere Sedimente, deren Carbonatreichtum zeigte, dass sie sich in einem Gewässer abgelagert hatten. Offenbar war der See lediglich vorübergehend ausgetrocknet. Im Endeffekt konnten wir zwei 14 Meter lange Kerne erbohren, die höchstwahrscheinlich bis zum Beginn der Seen-


ULRIKE HERZSCHUH



STEFFEN MISCHKE

Die Bohrung erfolgte in Einzeletappen von zwei Metern. Danach wurde der Bohrer jeweils zur Entnahme des Bohrkerns hochgeholt. Dazu diente die hier von der Autorin Ulrike Herzschuh betätigte Ziehvorrichtung.

Entwicklung nach der letzten Eiszeit vor rund 18000 Jahren zurückreichen. Es sind die längsten Bohrkerne, die bisher für paläoklimatische Untersuchungen aus dieser Region gewonnen wurden.

Aber den Ertrag der Expedition sicher in die Labors zu transportieren, war mit neuen Schwierigkeiten verbunden. Unerwartet einsetzende Schneefälle gefährdeten die Rückfahrt über die mehr als 4000 Meter hohen Pässe. Der Kleintransporter kam gerade einmal im Schritttempo voran – nicht nur angesichts der ungeheizten Fahrerkabinen eine Zitterpartie.

Nachdem nun Forscher und Material wohlbehalten zurückgekehrt sind, geht es an die Auswertung der Bohrproben. Sie liegt in den Händen eines multinationalen Teams. Unsere chinesischen Kooperationspartner an der Universität Lanzhou bestimmen geochemische und sedimentologische Parameter wie den Gesamtgehalt an organischer Substanz und die Korngrößenverteilung. Für die Analyse der Kieselalgenschalen sind Spezialisten des University College in London zuständig. Wir selbst untersuchen die Kopfkapseln der Zuckmücken-Larven, die Schalen der rund einen Millimeter großen Muschelkrebse und den Pollen.

Auf diese Weise können wir feststellen, wie sich das Artenspektrum im See mit der Zeit geändert hat. Daraus wiederum ergeben sich Informationen über Parameter wie Seetiefe sowie Nährstoff- und Salzgehalt, die ihrerseits Rückschlüsse auf den Zustand dieses Ökosystems erlauben. Zwar lassen sich die Vegetationsgesellschaften nicht im Einzelnen rekonstruieren, da der Pollen aus unterschiedlicher Entfernung in den See gelangt ist und seine Analyse gewöhnlich nur die Pflanzengattungen verrät. Doch allgemeine Aussagen über die Vegetationsentwicklung sind möglich. So kann man die klimatisch bedingte Verschiebung der Baumgrenze und der Höhenstufen der verschiedenen Pflanzengemeinschaften ermitteln. Des Weiteren gelingt es, einzelne Abschnitte des Bohrkerns den Lebensräumen Wüste, Halbwüste, Steppe oder Nadelwald zuzuordnen.

Diese Informationen über die Entwicklung der Land- und Süßwasser-Ökosysteme erlauben schließlich Rückschlüsse auf den Wandel des Klimas in Zentralasien während der letzten 18000 Jahre. Damit erweitern sie die Daten-Grundlage für die Bewertung von Computermodellen, die Voraussagen der zukünftigen Klima-Entwicklung machen und an geologischen Archiven der jüngsten erdgeschichtlichen Vergangenheit getestet werden. Um die Entwicklung der einstigen Umwelt in allen Feinheiten rekonstruieren zu können, ist es wichtig, viele Proben auszuwerten, aber auch möglichst genaue Informationen über das Alter der einzelnen Abschnitte des Bohrkerns zu haben. Zu diesem Zweck werden Pflanzenreste aus sechs verschiedenen Sedimenthorizonten an der Universität Kiel mit Hilfe der Radiokohlenstoff-Methode datiert.

Um den See-Sedimenten aus dem Qilian-Gebirge ein Maximum an Informationen zu entlocken, müssen Wissenschaftler unterschiedlicher Fachrichtungen sie unter die Lupe nehmen. Selten sind die Spezialkenntnisse und technischen Voraussetzungen für solche multidisziplinären Projekte sämtlich an einer Universität oder auch nur in einem Land vorhanden, sodass ein internationaler Verbund die Erfolgschancen beträchtlich erhöht. Da die Untersuchungsgebiete, auf die sich die Forschungsinteressen der Berliner Geowissenschaftler richten, zum großen Teil auf dem Territorium der Volksrepublik China liegen, kommt der Kooperation der Freien Universität Berlin mit der Universität Lanzhou große Bedeutung zu. Wie sinnvoll und fruchtbar sie ist, zeigt sich daran, dass sie sich seit ihrem Beginn vor gut zehn Jahren kontinuierlich intensiviert hat. ■

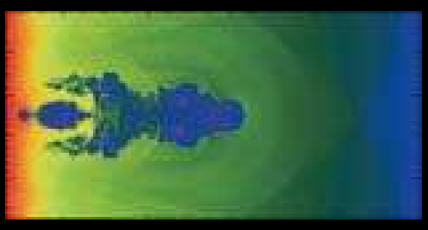
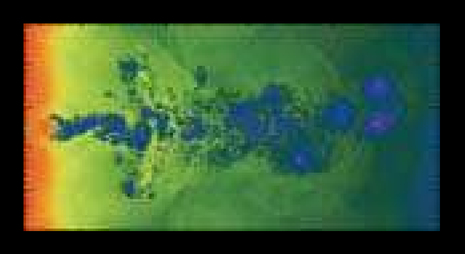
Ulrike Herzschuh *ist Diplombiologin und* **Steffen Mischke** *promovierter Geowissenschaftler. Beide arbeiten am Interdisziplinären Zentrum für Ökosystemdynamik in Zentralasien der Freien Universität Berlin.*

Gasfontänen in Galaxienhaufen

relative Gasdichte in logarithmischer Skala
-3,0 -2,5 -2,0 -1,5 -1,0 -0,5 0,0

MARCUS BRÜGGEN UND CHRISTIAN R. KAISER

Galaxienhaufen enthalten große Mengen Plasma (ionisiertes Gas), das Strahlung aussendet und daher abkühlt. Dieses erkaltete Material sollte sich im Zentrum des Haufens sammeln. Tatsächlich findet sich dort jedoch viel weniger davon als erwartet. Nun gibt es in Galaxienhaufen meist aktive Kerne, die – von Schwarzen Löchern angetrieben – ihrer Umgebung Energie zuführen und sie so wieder aufheizen können. Unklar blieb bisher jedoch, auf welche Weise das geschieht. Diskutiert wurden konvektive Heizung durch Umwälzen der Gasmassen oder heiße „Jets“, die mit fast Lichtgeschwindigkeit ausgeschleudert werden. Nun haben Marcus Brüggen von der Internationalen Universität Bremen und Christian R. Kaiser von der Universität Southampton mit hydrodynamischen Simulationen gezeigt, dass heiße Gasblasen einfach unter der Wirkung ihres Auftriebs nach außen „aufsteigen“ können – ähnlich der Rauchfahne aus einem Schornstein. Mit diesem Heizmechanismus lässt sich das Defizit an kühlem Gas erstmals in allen Einzelheiten erklären. Die Bildreihe unten zeigt das Aufsteigen einer Blase im Verlauf von wenigen hundert Millionen Jahren.

Der Sexualtrick der

Manche jugendlichen männlichen Orang-Utans täuschen körperliche Unreife vor. So bleiben sie von den Revierbesitzern unbehelligt, wenn sie sich Weibchen in eindeutiger Absicht nähern. Hormonell sind sie aber erwachsen und zeugen Nachwuchs.

Von Anne Nacey Maggioncalda und Robert M. Sapolsky

Bei keinem anderen Primaten, auch nicht bei Menschenaffen, sind Männchen und Weibchen derart unterschiedlich groß geraten: Ein erwachsener Orang-Utan-Mann wiegt mehr als doppelt so viel wie ein erwachsenes weibliches Tier. Die erwachsenen Männer mit ihren rund neunzig Kilogramm Gewicht fallen außerdem durch ihr langes orangerotes Haarkleid auf, das oft wie eine Schleppe wirkt. Eindrucksvoll erscheinen zugleich die mächtigen Backenwülste und der große Kehlsack, der ihrem weithin erschallenden Revierruf Resonanz verleiht.

Eben geschlechtsreife Orang-Utan-Männchen wirken längst nicht so imposant. Sie sind kaum schwerer als erwachsene Weibchen, von denen sie sich äußerlich noch wenig unterscheiden. Die Pubertät erreichen sie mit sieben bis neun Jahren. Bis sie danach die volle Größe gewinnen und die auffallenden sekundären Geschlechtsmerkmale eines voll erwachsenen Affenmannes ausbilden, dauert es einige Zeit. Doch im Alter von zwölf bis fünfzehn Jahren sind sie normalerweise herangewachsen und nun eine beeindruckende Erscheinung. Auch stellen sie dann eine ernst zu nehmende Konkurrenz für jeden Revierbesitzer dar und treten auch jetzt erst als Paarungspartner der Weibchen auf. Dies glaubten Primatologen zumindest.

Doch sie hatten sich in *Pongo pygmaeus*, wie der rote Menschenaffe aus den Regenwäldern Borneos und Sumatras mit wissenschaftlichem Namen heißt, getäuscht. Schon als in Zoos die ersten festen sozialen Gruppen von Orang-Utans etabliert wurden, beobachteten die Wärter, dass sich einige heranwachsende Männchen oft jahrelang, mitunter während des ganzen zweiten Lebensjahrzehnts, anscheinend überhaupt nicht weiterentwickelten.

Später berichteten auch Freilandforscher, unter anderen die amerikanische Primatologin Biruté M. F. Galdikas von der Simon Fraser University in Burnaby (British Columbia, Kanada), dass auch wild lebende halbwüchsige Orang-Utan-Männchen manchmal zehn Jahre oder länger körperlich im Stadium von Jugendlichen verharren. Es schien,

Junge Orang-Utan-Männchen bluffen: Äußerlich bleiben sie jugendlich-kindlich, auch wenn sie es bereits auf Weibchen abgesehen haben.



jungen Orang-Utans

FRANS LANTING / MINDEN PICTURES

als verschwendeten diese Tiere die Hälfte der Zeit, die ihnen sonst zur Fortpflanzung zur Verfügung steht.

Entwicklungsverzögerungen wie die hier beschriebene interessieren schon deswegen, weil Biologen an solchen Phänomenen gut die Mechanismen von Wachstum und Reifung aufklären können. Mitunter beruht ein Wachstumsstopp bei einem Tier oder auch beim Menschen auf einer genetischen Störung, wenn etwa Zellen Wachstumssignale nicht empfangen können. Aber auch Umweltfaktoren verlangsamen oder verhindern unter Umständen die weitere Entwicklung. Nahrungsmangel beispielsweise kann die Reifung verzögern, was aus evolutionärer Sicht Sinn macht. Denn wer ohnehin fast verhungert, sollte nicht noch Energie zum Wachsen oder für imposante sekundäre Geschlechtsmerkmale verschwenden. Bekannt ist auch, dass die Pubertät bei Magersucht manchmal verspätet eintritt, ebenso bei extremer körperlicher Dauerbeanspruchung, etwa wenn Kinder sportlich hart trainieren.

Bei den Orang-Utans (kurz Orangs genannt) dagegen geht die stagnierende Entwicklung der jungen Männchen anscheinend auf die soziale Umwelt zurück. Offenbar verursachen voll erwachsene Orang-Utan-Männer den Wachstumsstopp. Wie Tierpfleger oder auch der Direktor des Zoos von Atlanta (US-Bundesstaat Georgia), Terry L. Maple, erkannten, wachsen die Jugendlichen offensichtlich nicht weiter, solange im selben Gehege ein erwachsener, dominanter männlicher Orang-Utan lebt. Nimmt man das große Tier heraus, beginnt ein junges Männchen bald an Größe zuzulegen und gleichzeitig auch die sekundären Geschlechtsmerkmale auszubilden. Da erwachsene Orang-Männer jüngere Geschlechtsgenossen oft aggressiv behandeln, glaubten Primatologen bisher an einen stressbedingten Entwicklungsstopp. Sie dachten, die jungen Männchen würden in ständiger Angst leben, und die hohe Belastung mit Stresshormonen würde die weitere geschlechtliche Entwicklung hemmen.

SARA CHEN

Orang-Utans leben heute wild nur noch in letzten Refugien auf Borneo und Sumatra (orange). Kaum 20 000 der roten Menschenaffen dürften dort noch vorkommen. Weil sie stark bejagt werden und wegen der rasanten Abholzung der letzten Urwälder auf diesen Inseln ist ihr Überleben in den nächsten Jahrzehnten nicht gesichert. Früher durchstreiften sicherlich Hunderttausende dieser „Waldmenschen" die Regenwälder Südostasiens.

Unsere Studien der letzten Jahre bestätigen diese Vermutung nicht. Denn es gelingt den unreif wirkenden Halbwüchsigen sehr wohl, Weibchen zu schwängern. Ihre wenig imposante Erscheinung hat aber vermutlich den Vorteil, dass die erwachsenen Männer sie als Widersacher kaum ernst nehmen. Unseres Erachtens ist die Entwicklungsverzögerung keine pathologische Erscheinung, sondern eine angepasste evolutionäre Strategie. Dabei könnte auch der viel niedrigere Energiebedarf mitzählen: Ein Männchen geringerer Größe muss längst nicht so viel fressen wie ein ausgewachsenes. Allerdings hat die Strategie auch ihren Preis: Freiwillig paaren sich die Weibchen mit so kümmerlichen Männchen nicht. Diese greifen zur Vergewaltigung.

Nicht Stress, sondern Bluff

Dass rangtiefe Tiermännchen in einem unreifen Entwicklungsstadium verharren können, wissen Verhaltensforscher auch von einigen anderen Säugetieren. Die dominanten Männer des Mandrills etwa, einer waldlebenden Pavianart in Afrika, zeichnen sich gegenüber unterlegenen Geschlechtsgenossen durch ein knallbuntes Gesicht und farbige Genitalien aus. Sie haben auch als Einzige große Hoden und hohe Testosteron-Werte. Bei Spitzhörnchen und vielen Nagerarten verzögert sich die Pubertät bei sozial unterlegenen Männchen. Frappant ist eine Auswirkung exzessiver Wilderei bei afrikanischen Elefanten. Vielerorts sind Jungbullen halb verwaist herangewachsen. Diese unzureichend sozialisierten Tiere werden in der testosteronabhängigen „Musth" – einem aggressiven Zustand der Paarungsstimmung – mitunter sehr rüpelhaft und gefährlich. Anscheinend machen ältere starke Bullen, die in solche Gebiete übersiedelt werden, dem ein Ende. Sie nehmen dort einen höheren Rang ein als die Jungbullen, und prompt kommen diese nicht mehr in die Musth.

Bei all diesen Tierarten sind sich die Wissenschaftler weitgehend einig, dass das Unterlegensein und die häufige Begegnung mit dem dominanten Artgenossen für die jungen Männchen sehr viel Stress bedeuten und dass dies ihr verändertes Verhalten und Phänomene wie eine stagnierende Entwicklung erklärt. Denn in einer Stresssituation, akut etwa auf der Flucht vor einem Feind, verwendet der Körper alle verfügbare Energie für diese heikle Lage. Alles andere stellt er solange zurück, auch Wachstum, physiologische Regeneration und Fortpflanzung. Normalerweise, so die Annahme, dauern solche bedrohlichen Zustände nur kurz. Halten sie allerdings lange an – wie

mitunter zwangsläufig bei sozialer Unterlegenheit –, kann das den Körper chronisch so stark belasten, dass Geschlechtshormonspiegel und Fortpflanzungsfähigkeit immerzu gedämpft werden. Bei jungen Tieren kann sich eine solche Belastung auch auf das Wachstum auswirken.

Manches spräche dafür, dass die jungen Orang-Utan-Männchen ebenfalls ständig unter Stress stehen. Zwar fällt es bei diesen Menschenaffen im Zoo besonders auf, wie erwachsene Männer jugendlichen zusetzen. Doch auch im Freiland tun die Halbwüchsigen gut daran, jedem Orang-Mann aus dem Weg zu gehen. Diese Tiere leben wild heute nur noch in einigen Urwaldgebieten Borneos und Sumatras. Ausgewachsene männliche Orang-Utans sind ausgesprochene Einzelgänger. Sie verteidigen in ihrem natürlichen Lebensraum große Reviere, die jeweils mehrere Gebiete von Weibchen umfassen. Ihre Besitzansprüche signalisieren die Revierinhaber mit einem strengen Moschusgeruch, den sie in ihrem Territorium verteilen, und durch ihre kilometerweit hallenden Rufe. Auch Orang-Weibchen bleiben, mit ihrem Nachwuchs, weitgehend für sich.

Die Stress-These hatten Primatologen an den roten Menschenaffen Südostasiens allerdings noch niemals genauer überprüft. Darum wollten wir herausfinden, ob junge, unterlegene Orang-Männchen wirklich in ihrer Entwicklung stehen bleiben, weil hohe Mengen von Stresshormonen ihren übrigen Hormonhaushalt verändern. Dazu mussten wir außer Stresshormonen auch die Spiegel von Geschlechts- und Wachstumshormonen bestimmen. Die erste Hürde, die wir 1989 in Angriff nahmen, war, von diesen Menschenaffen überhaupt geeignete Hormonproben zu erhalten. Ideal wären Blutproben gewesen, doch dies schied aus ethischen und praktischen Gründen aus. Aber auch Harn enthält verschiedenste Hormone in Konzentrationen, welche die Durchschnittswerte im Blut recht gut spiegeln.

Im südostasiatischen Regenwald von den „Waldmenschen“ – so die Übersetzung von *orang-utan* aus dem Malaiischen – Urinproben zu sammeln, erschien praktisch aussichtslos. Die roten Menschenaffen bewegen sich, anders als die drei afrikanischen Menschenaffen-Arten, am liebsten ausschließlich hoch in den Bäumen. Mit ihren langen Armen und riesigen Händen sind sie hervorragend daran angepasst. Sogar wenn sie weite Strecken zurücklegen, etwa weil sie fruchtende Bäume aufsuchen, kommen sie selten auf den Boden, völlig



FRANS LANTING, MINDEN PICTURES

Durch breite Backenwülste und Kehlsack – sekundäre Geschlechtsmerkmale erwachsener Männchen – wirkt das Gesicht des Orang-Utan-Manns riesig. Auch in der Größe überragt er erwachsene Weibchen und hat ein viel längeres Fell.

anders als Schimpansen, Bonobos und Gorillas. Hinzu kommt, dass Orang-Utans keine größeren Gruppen bilden wie die Menschenaffen Afrikas, sondern bevorzugt einzeln oder höchstens zusammen mit ganz wenigen Artgenossen umherstreifen.

Wir beschlossen, uns auf Zootiere zu beschränken. Mit der dankenswerten Hilfe und Unterstützung vieler Tierpfleger, Tierärzte und Kuratoren stellten uns 13 Zoos insgesamt über tausend Urinproben von 28 männlichen Orangs zur Verfügung. Zu jeder Probe erhielten wir genaue Angaben über das Alter und Entwicklungsstadium des Tiers. Wir unterschieden vier Kategorien: „Jungtier“, „jugendlich, Entwicklung stagniert“, „jugendlich, wächst und reift weiter“ und „erwachsen“. Wir erhielten von den Zoos auch Daten über das bisherige Wachstum des Affen, seine medizinische Vorgeschichte, die Unterbringung und die Ernährung. Zusammen mit Nancy Czekala vom Zentrum für die Erhaltung bedrohter Arten des Zoos von San Diego bestimmten wir aus den Proben für diese vier Entwicklungsstadien die Werte von neun verschiedenen Hormonen.

Zur Kontrolle untersuchten wir zunächst das für Wachstum unabdingbare so genannte Wachstumshormon. Dessen Werte waren bei den Jungtieren, bei den im Wachstum stagnierenden Jugendlichen sowie bei den Erwachsenen niedrig und zudem mit nur 15 Prozent Abweichung untereinander bemerkenswert ähnlich. Die jugendlichen Orang-Männchen aber, deren Entwicklung augenblicklich rasch voranschritt, wiesen etwa dreimal so hohe Wachstumshormonspiegel auf. Der Entwicklungsschub, ▶

in dem aus dem Jugendlichen ein prachtvoller Orang-Utan-Mann wird, spiegelt sich demnach auch in den Werten dieses für Wachstum relevanten Hormons.

Wie sah der Zusammenhang nun bei den Stresshormonen aus? Das vielleicht bekannteste von ihnen dürfte Adrenalin sein, das entscheidend zur Mobilisierung von Energie im Stoffwechsel beiträgt. Doch um auf die Konzentrationen von Adrenalin im Blut rückzuschließen, eignet sich Urin leider nicht. Jedoch kann man im Harn Hormone aus der Klasse der Glucocorticoide der Nebennierenrinde gut erfassen, die ebenfalls zu den Stress-Schlüsselhormonen rechnen und zu denen Cortisol gehört. Diese Hormone können Wachstum, Regeneration von Geweben und Fortpflanzung unterdrücken. Zusätzlich bestimmten wir die Konzentration des Hormons Prolaktin, das ebenfalls einen Stresszustand anzeigt. Dieses kann die Fortpflanzung hemmen.

Diese Messungen brachten eine große Überraschung. Bei Jungtieren, Jugendlichen mit stagnierender Entwicklung und Erwachsenen unterschieden sich weder die Werte der Glucocorticoide noch die des Prolaktins erkennbar. Im Vergleich dazu lagen die Spiegel von jugendlichen, im Entwicklungsschub befindlichen Männchen für Glucocorticoide und Prolaktin ungefähr doppelt so hoch. Offenbar standen nicht die im Wachstum stagnierenden Männchen massiv unter Druck, sondern die Halbstarken, die gerade einen Reifungsschub durchmachten!

Nicht weniger staunten wir über die Geschlechtshormone. Erwartungsgemäß zeigten die körperlich aufblühenden jungen Orang-Utan-Männer bei Testosteron Werte, die auf aktive Geschlechtsorgane hinweisen. Das Gleiche stellten wir bei dem die Bildung und Freisetzung von Testosteron anregenden luteinisierenden Hormon fest. Diese Hormonspiegel waren tatsächlich höher als bei den nicht wachsenden Jugendlichen. Dennoch zeigten zu unserer Überraschung die in ihrer Entwicklung stockenden Männchen für beide Hormone die gleichen Werte wie erwachsene Orang-Utan-Männer. Auch wiesen sie für das follikelstimulierende Hormon, das die Spermienreifung steuert, genauso hohe Konzentrationen auf wie die heranreifenden und die vollerwachsenen Geschlechtsgenossen. Hierzu passen Befunde anderer Forscher: Demnach haben im Wachstum aussetzende jugendliche Orang-Utans nicht nur reife Spermien, sondern auch gleich große Hoden wie ihre weiterwachsenden Altersgenossen.

Diese Ergebnisse stellen lang gehegte Ansichten über die sozialen Verhältnisse bei Orang-Utans auf den Kopf. Denn offenkundig sind die in ihrer Entwicklung stagnierenden, unauffälligen jugendlichen Männchen entgegen aller Erwartung weder sonderlich gestresst noch zeugungsunfähig. Was ist da los? Die Antwort lautet: Ein Orang-Utan-Mann kann seine Fortpflanzungschancen offenbar auf mehr als einem Weg erhöhen.

Strategie Unauffälligkeit

Zu den Grundthesen der modernen evolutionsbiologisch orientierten Verhaltensforschung gehört die Annahme, dass gewisse soziale Verhaltensmuster von Tieren entgegen dem Anschein nicht zum Wohle der Art oder der sozialen Gemeinschaft entstanden. Vielmehr verhelfen sie nach dieser Theorie dem Individuum dazu, seine Gene möglichst oft weiterzugeben; dabei zählt auch mit, wenn genetisch mit ihm eng verwandte Artgenossen dieselben Gene verbreiten. Um das Verhalten von Primaten unter diesen Prämissen zu erfassen, wendeten Forscher lange meist recht vereinfachte Modelle an. So gab es darin für Affen-Männer praktisch nur Wettbewerb und Aggression. Um Zugang zu Weibchen zu erlangen, mussten sie einen hohen Rang erkämpfen. Denn wenn nur ein paarungsbereites Weibchen in Sicht war, konnte allein das ranghöchste Männchen zum Zuge kommen. Standen zwei Weibchen zur Verfügung, erhielt auch der rangzweite Mann seine Chance und so weiter.

In Wirklichkeit sind so klare Verhältnisse bei gruppenlebenden Primaten selten anzutreffen. Um ihren Reproduktionserfolg zu steigern, können die männlichen Tiere offensichtlich auch völlig andere Strategien verfolgen. Doch warum existieren überhaupt Alternativen wie anscheinend bei Orang-Utans? Ein Aspekt dürfte sein, dass es auch Nachteile hat, als Kraftprotz mit allen Anzeichen sexueller Potenz aufzutreten. In der Re-

Junge Männchen verharren körperlich in einem jugendlich-unauffälligen Stadium (unten). In dieser Phase bleiben sie so groß wie Weibchen (rechts eines mit Jungem).

THEO ALLOFS / CORBIS



Literaturhinweise

Meine Orang-Utans. Von Biruté M. F. Galdikas. Scherz-Verlag, 1998.

Orang Utans. Von Konrad Wothe und Carsten Clemens. Tecklenborg-Verlag, 1996.

Male Orangutan Subadulthood: A New Twist on the Relationship between Chronic Stress and Developmental Arrest. Von Anne N. Maggioncalda, Nancy M. Czekala and Robert M. Sapolsky in: American Journal of Physical Anthropology, Bd. 118, Heft 1, S. 25, Mai 2002.

Orangutans: Wizards of the Rain Forest. Von Anne E. Russon, Firefly Books, 2000.

Weblinks zum Thema bei **www.spektrum.de** *unter „Inhaltsverzeichnis“*

gel verlangt dies erhöhte Testosteronwerte, was sich auf Dauer gesundheitlich in mancher Hinsicht nicht zum Besten auswirkt. Zudem bleibt ein Affe in den ständigen harten Auseinandersetzungen mit Konkurrenten auch nicht unbedingt körperlich unbeschadet.

Ein größeres Tier muss außerdem mehr Nahrung finden und hat darum in Hungerzeiten eher das Nachsehen. Bei Orang-Utans, die überwiegend Früchte verzehren, kommt hinzu, dass die schweren erwachsenen Männer sich nicht so hoch in die Bäume wagen können wie die leichteren Weibchen und die halbwüchsigen Männchen, weil die dünneren Äste mit den besten Früchten sie nicht mehr tragen. Mit ihrer Größe und ihrem imposanten Aussehen fallen sie sicherlich auch Raubtieren eher auf. Aber vor allem fordert ihre Erscheinung angriffslustige Geschlechtsgenossen heraus.

Das fängt schon an, wenn bei jungen Männchen die sekundären Geschlechtsmerkmale aufzutreten beginnen. So dürfte sich erklären, warum diese Heranwachsenden so hohe Werte von Stresshormonen aufweisen: Die erwachsenen Männer fühlen sich durch die aufkeimende Konkurrenz herausgefordert und verweisen die Halbstarken bereits bei den ersten Anzeichen in ihre Schranken. Dieses Muster ist für viele Tiere typisch. Haremshengste etwa vertreiben junge Hengste erst in diesem Alter. Wie einer von uns (Sapolsky) feststellte, haben auch Paviane besonders viel Stresshormone, wenn sie bisher in einer unterlegenen Position waren, nun aber das dominante Tier herausfordern.



W. PERRY / CORBIS

Ganz anders ein halbwüchsiges Orang-Männchen, das im Stadium eines Jugendlichen verharrt. Ein solches Tier wirkt auf einen erwachsenen Mann offensichtlich nicht bedrohlich, sondern kindlich harmlos. Wie die Hormonwerte andeuten, erspart sich der Jugendliche mit seiner Strategie eine Menge Ärger. Und vor allem kann er einigermaßen unbehelligt Kontakt zu Weibchen aufnehmen. Vaterschaftstests zufolge stammt bei vielen Primaten ein beträchtlicher Teil des Nachwuchses von rangtiefen Männchen. Die jungen Orang-Utans, die in ihrer Entwicklung innehalten, stehen darin nicht nach. Viele Geburten im Zoo gehen nachweislich auf sie zurück. Die Primatologin Sri Suci Utami von der Universität Utrecht (Niederlande) berichtete kürzlich auch aus dem Freiland, dass in ihrem Studiengebiet auf Sumatra gut die Hälfte der Orang-Babies solche unauffälligen jugendlichen Väter haben.

Nur: Wie gelingt das den Halbwüchsigen? Bei manchen gruppenlebenden Primaten, etwa dem Steppenpavian, wählen die Weibchen aktiv ihre Paarungspartner. Oft richten sie sich dabei nicht nach dem Rangerfolg, sondern bevorzugen ein Männchen, das sich Weibchen eng anschließt und um Jungtiere kümmert, sich aber aus Rangauseinandersetzungen heraushält. Sogar wenn ein ranghoher Pavian-Mann das Weibchen bewacht, gelingt es diesem oft, die Paarung mit einem rangniederen Männchen zu erschleichen. Verhaltensforscher nennen dies gestohlene Kopulationen. So zahlt es sich für rangtiefe Paviane aus, Freundschaften mit Weibchen zu pflegen. Sie umgehen die Stoffwechselkosten, Verletzungen und Belastungen des harten Männchenwettbewerbs.

Die jugendlichen Orang-Männchen schließen mit potenziellen Paarungspartnerinnen dagegen keine Dauerfreundschaften. Höchstens kommt es vor, dass sie tagelang mit einem Weibchen umherziehen. Dennoch zeigen die allermeisten Weibchen nur an Paarungen mit erwachsenen Orang-Utan-Männern Interesse. Zoo- und Freilandbeobachtungen zufolge scheinen die jungen Männchen Kopulationen zu erzwingen. Das sind regelrechte Vergewaltigungen, denn die Weibchen wehren sich meistens heftig. Sie versuchen zu beißen und stoßen laute Grunzlaute aus, die man sonst nie bei ihnen hört. Auch vollerwachsene Orang-

THEO ALLOFS, CORBIS

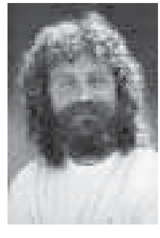
Im Tanjung Puting Nationalpark auf Borneo hält diese Orang-Utan-Mutter mit ihrem Kind Siesta.

Männer vergewaltigen gelegentlich Weibchen, doch das kommt sehr viel seltener vor. Von 151 Paarungen wachstumsgehemmter junger Männchen, die der Primatologe John C. Mitani von der Universität von Michigan in Ann Arbor und sein Team in den 1980er Jahren auf Borneo beobachteten, waren 144 erzwungen.

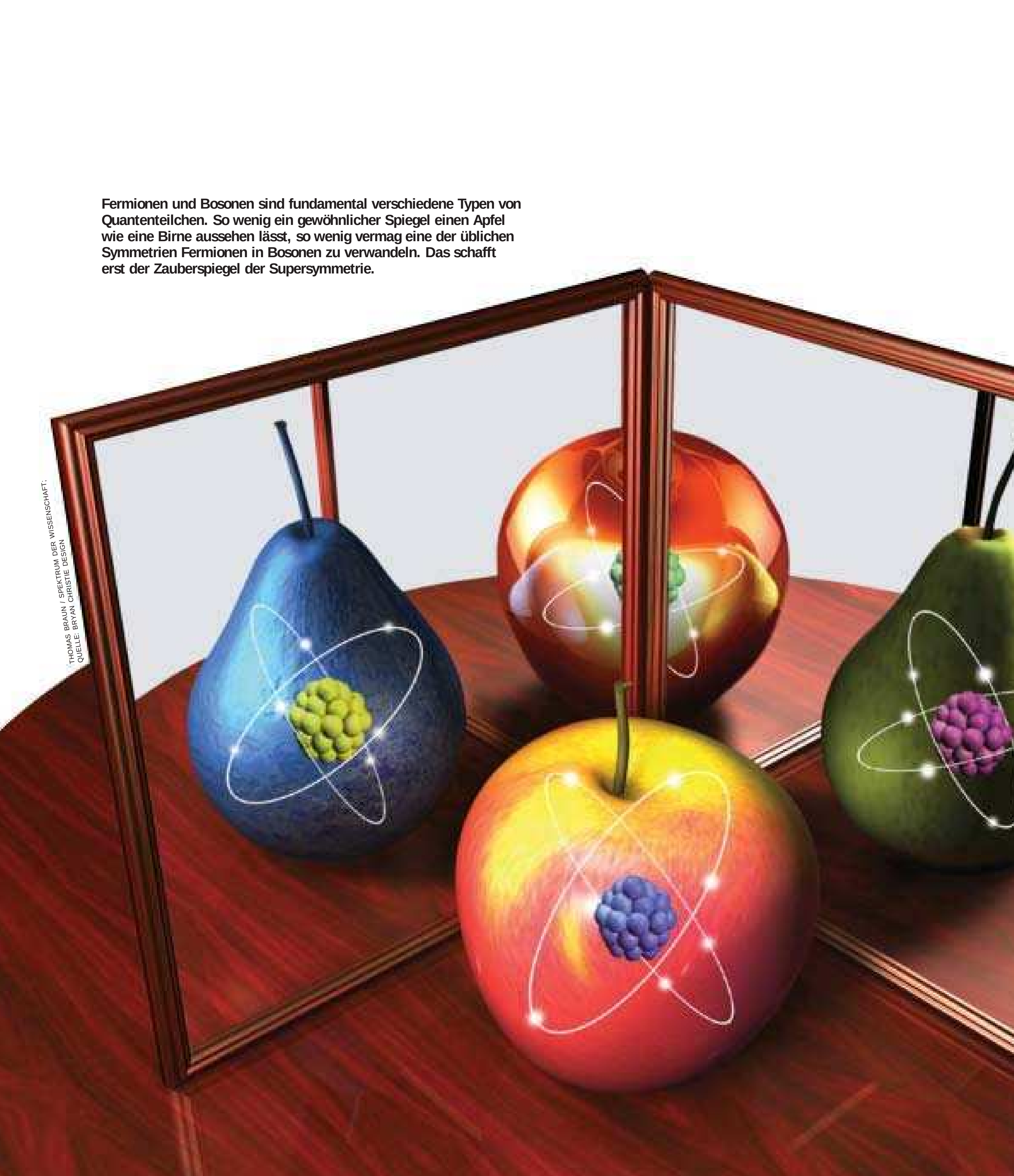
Wie es aussieht, sind bei Orang-Utans zwei mögliche Fortpflanzungsstrategien entstanden. Falls kein erwachsener männlicher Orang-Utan im Umfeld lebt, reifen jugendliche Männchen gewöhnlich rasch zu einem imposanten Kerl heran, der bei den Weibchen guten Erfolg hat. Im anderen Fall, wenn ein dominantes Männchen vorhanden ist, können sie zumindest das Beste aus ihrer Situation machen, indem ihre Entwicklung stagniert und sie die Vorteile dieses Zustandes nutzen. Wachstum und Reifung zum Erwachsenen sowie dazu passendes Verhalten setzen beim Jugendlichen aber offenbar rasch ein, wenn der erwachsene Orang-Mann aus irgendwelchen Gründen nicht mehr anwesend ist. Zurzeit untersuchen Physiologen, wie die sozialen Einflüsse dabei die charakteristischen hormonellen Umstellungen bewirken.

Aus diesen Befunden lässt sich Verschiedenes lernen. Wie sich zeigt, muss eine Situation für ein Tier keine Stressbelastung bedeuten, auch wenn uns dies von unserer Warte aus so vorkommen mag. Je nach sozialen oder ökologischen Lebensbedingungen können völlig unterschiedliche Fortpflanzungsstrategien angesagt sein: Nach einem einfachen Rezept kann man die Evolution von Verhalten nicht erklären. Zudem darf man Verhaltensstrategien von Tieren nicht nach menschlichen Kriterien werten, auch wenn uns die Partnerwahl von Seiten der Weibchen gegen die Interessen ranghoher Männchen emotional eher zusagt als Vergewaltigungen. Dafür, dass Primaten sich nicht wie in einer heilen Disney-Welt benehmen, fanden Verhaltensforscher inzwischen viele Beispiele. Bei Grauen Languren in Indien kommen nach dem Machtwechsel von Männchen regelmäßig Kindstötungen vor. Schimpansen-Männer ziehen sogar im Verband gegen andere Gruppen aus und bringen dabei Artgenossen um.

Vor allem darf man menschliches Verhalten nicht einfach durch Verhaltensbefunde an einer Affenart erklären wollen. Dass bei Orangs Vergewaltigung auftritt, heißt noch lange nicht, dass dies ein natürliches und darum unabdingbares Verhalten des Menschen wäre, auch wenn es beim Menschen vorkommt. Nicht nur sind Orang-Utans unseres Wissens bislang die einzigen Primaten, die regelmäßig auf diese Weise Nachkommen zeugen. Sondern bei genauem Hinsehen ist ihr Verhalten trotz allem auch völlig verschieden von den menschlichen Verbrechen: So ergab keine einzige Beobachtung einer erzwungenen Kopulation bei den roten Waldmenschen irgendwelche Anzeichen dafür, dass ein Männchen das Weibchen absichtlich verletzt hätte. Der Vergleich passt schon deshalb nicht, weil Orangs völlig anders leben und in physiologischer und sozialer Hinsicht ganz anders sind als jeder andere Primat. In einzigartiger Weise haben sie sich an ihre Umwelt angepasst. Es wäre höchst absurd, zwischen ihrem Verhalten und dem des Menschen leichtfertig Parallelen zu ziehen. ■

Anne Nacey Maggioncalda *und* ***Robert M. Sapolsky*** *erforschen seit mehr als zehn Jahren die Fortpflanzungsstrategien von Orang-Utans. Maggioncalda promovierte 1995 an der Duke University in biologischer Anthropologie und Anatomie. Sie lehrt an der Stanford University (Kalifornien). Sapolsky promovierte 1984 an der Rockefeller University in New York in Neuroendokrinologie. Er ist Professor an der Stanford University und Gastforscher an den Nationalmuseen von Kenia.*



Fermionen und Bosonen sind fundamental verschiedene Typen von Quantenteilchen. So wenig ein gewöhnlicher Spiegel einen Apfel wie eine Birne aussehen lässt, so wenig vermag eine der üblichen Symmetrien Fermionen in Bosonen zu verwandeln. Das schafft erst der Zauberspiegel der Supersymmetrie.

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT;
QUELLE: BRYAN CHRISTIE DESIGN

KERNPHYSIK

Supersymmetrie in Atomkernen

Eine theoretisch postulierte Symmetrie, die man an Elementarteilchen erst mit künftigen Beschleunigern nachzuweisen hofft, offenbart sich auf überraschende Weise in den Kernen von Platin und Gold.

Von Jan Jolie

Die Supersymmetrie ist zunächst eine für Physiker äußerst reizvolle, aber noch unbewiesene Theorie zur Vereinheitlichung der Elementarteilchen. Diese Symmetrie vertauscht zwei grundverschiedene Sorten von Teilchen gegeneinander: einerseits die so genannten Fermionen, zu denen Elektronen, Protonen, Neutronen und andere Bausteine der Materie zählen, andererseits die Bosonen – beispielsweise Photonen –, die Träger der Naturkräfte. Fermionen sind die geborenen Einzelgänger der Quantenwelt: Niemals besetzen zwei zugleich denselben Quantenzustand. Ihre Abneigung gegen allzu enge Nachbarschaft ist so stark, dass sie einen Neutronenstern davon abhält zu kollabieren, selbst wenn die erdrückende Wucht der Schwerkraft alle anderen Naturkräfte übersteigt. Hingegen sind Bosonen gesellige Zeitgenossen, die sich bereitwillig im gleichen Zustand versammeln. Jedes Boson in einem bestimmten Quantenzustand ermutigt seine Artgenossen, es ihm gleichzutun. Unter geeigneten Bedingungen bilden Bosonen disziplinierte Klon-Armeen – etwa die Photonen in einem Laserstrahl oder die Atome in superflüssigem Helium-4.

Erst im Zauberspiegel der Supersymmetrie sehen abweisende Fermionen aus wie umgängliche Bosonen und umgekehrt. Diese Symmetrie erlaubt es gleichsam, Äpfel mit Birnen zu vergleichen. Bildlich gesprochen nimmt ein Apfel im Spiegel der Supersymmetrie die Gestalt und den Geschmack einer Birne an. Allen gewohnten Symmetrien der Physik fehlt diese Zauberkraft; selbst wenn sie – gleich Zerrspiegeln eines Lachkabinetts – gewöhnliche Elektronen wie geisterhafte Neutrinos aussehen lassen, können sie niemals ein Fermion in ein Boson verwandeln. Das vermag nur die Supersymmetrie.

Dies behaupten jedenfalls die Theoretiker, die sich seit den 1970er Jahren intensiv mit der Vereinheitlichung der Elementarteilchenphysik befassen. Viele ▶

IN KÜRZE

➤ **Fermionen und Bosonen** sind zwei gegensätzliche Typen von Quantenteilchen. Zu den Fermionen zählen Bausteine der Materie wie Elektronen, Protonen und Neutronen. Zu den Bosonen gehören Quanten der Naturkräfte, etwa die Photonen als Träger der elektromagnetischen Kraft oder die Gluonen als Bindungsteilchen der Quarks.

➤ **Symmetrien** spielen in der Physik eine zentrale Rolle. Während alle herkömmlichen Symmetrien den Unterschied zwischen Bosonen und Fermionen respektieren, vertauscht die Supersymmetrie die beiden Teilchenarten. Diese Symmetrie wurde zur Vereinheitlichung der Teilchenphysik postuliert, konnte aber bislang an Elementarteilchen nicht experimentell bewiesen werden.

➤ Im **Atomkern** bilden Protonen und Neutronen – beides Fermionen – gern Paare, die sich wie Bosonen verhalten. Die Kerne ordnen sich somit in vier unterschiedliche Klassen, je nachdem ob Protonen oder Neutronen oder beide vollständig gepaart sind: gerade-gerade, gerade-ungerade, ungerade-gerade und ungerade-ungerade. Eine Variante der Supersymmetrie kann vier solche Kerne zu einem „magischen Quadrat“ verbinden. Diese Erwartung wurde jetzt experimentell bestätigt.

Kernmodelle

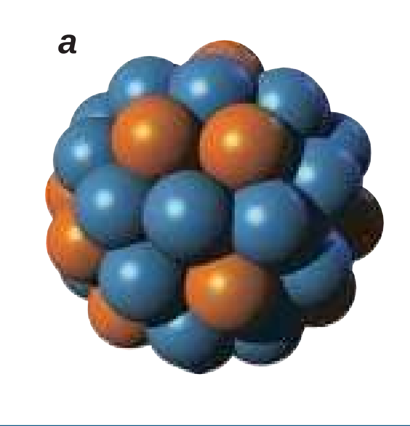
Schalen, Tröpfchen, magische Quadrate

Atomkerne (*a*) sind extrem eng gepackte Gebilde aus Protonen (orange) und Neutronen (blau) – 100 Billionen Mal so dicht wie Wasser. Wegen der Stärke und Kompliziertheit der Kernkräfte sind die Physiker auf Näherungsmodelle angewiesen, um die Quantenzustände von Kernen zu beschreiben.

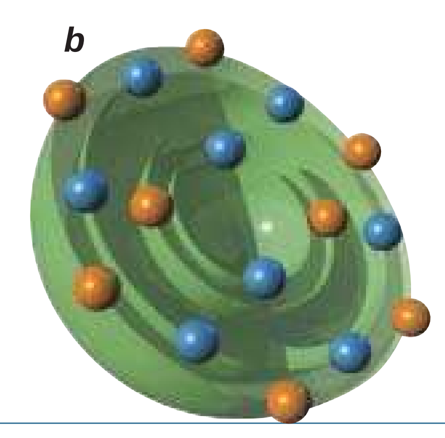
Das Schalenmodell (*b*) des Kerns ähnelt dem Atommodell mit seinen Elektronenschalen. Wie die Elektronen im Atom gruppieren sich die Nukleonen – allerdings separat für Protonen und Neutronen – in Schalen, die durch Energielücken getrennt sind und auf die nur eine bestimmte Anzahl Nukleonen passt. Kerne mit einer vollen Protonen- oder Neutronenschale sind besonders stabil – ähnlich wie die Edelgas-Atome mit ihren abgeschlossenen Elektronenschalen –, vor allem solche, bei denen sowohl Protonen- als auch Neutronenschalen voll sind.

Wenn ein Kern außerhalb einer abgeschlossenen Schale nur wenige zusätzliche Nukleonen besitzt (*c*), betrachten die Theoretiker vor allem deren Wechselwirkungen und vernachlässigen die Nukleonen der vollen Schalen. Doch bei schweren Atomkernen mit vielen Nukleonen jenseits der abgeschlossenen Schalen versagt dieses Näherungsverfahren: Die Berech-

a



b



hoffen, auf diese Weise im Verständnis der fundamentalen Teilchen und Kräfte einen entscheidenden Schritt weiterzukommen. Experimentalphysiker ihrerseits versuchen, die von der Theorie vorhergesagten supersymmetrischen Teilchen zu finden, indem sie in Beschleunigern heftige Teilchenstöße extrem hoher Energien erzeugen. Doch bislang ist diese Suche vergeblich geblieben.

In den 1980er Jahren vermuteten einige Kernphysiker, dass Supersymmetrie nicht erst künftig bei energiereichen Kollisionen einzelner Elementarteilchen zum Vorschein kommen könnte, sondern vielleicht in anderer Form in bestimmten Atomkernen auftritt. Auch dabei sollte der Zauberspiegel eine Beziehung zwischen physikalisch höchst unterschiedlichen Objekten herstellen – zwischen Kernen mit geraden und ungeraden Nukleonenzahlen. Dabei sind wieder Fermionen und Bosonen im Spiel: Die Nukleonen, das heißt die Kernteilchen Proton und Neutron, sind Fermionen, und ein aus einer ungeraden Zahl von Fermionen zusammengesetztes Teilchen verhält sich insgesamt als Fermion, während aus einer geraden Fermionen-Anzahl ein Boson hervorgeht.

Der Atomkern als Tanzsaal

Um die nukleare Supersymmetrie besser zu verstehen, stellen wir uns an Stelle der Nukleonen, die den Atomkern bilden, einen Saal voller Balltänzer vor. Bei einer geraden Anzahl von Tänzern hat jeder Ballbesucher einen Partner, und das Geschehen lässt sich einfach als das Verhalten von Tanzpaaren beschreiben. Bei einer ungeraden Anzahl stolpert eine überzählige Person einsam auf dem Tanzboden umher.

Doch im Zauberspiegel der Supersymmetrie sieht diese Person wie ein weiteres Tanzpaar aus, das im Gleichschritt mit allen anderen tanzt. Dementsprechend ist ein Atomkern, der eine ungerade Anzahl von Protonen und Neutronen enthält, supersymmetrisch mit einem Kern verknüpft, dessen Nukleonen samt und sonders gepaart sind.

Tatsächlich haben Experimentalphysiker vor kurzem eine Form dieser außergewöhnlichen Symmetrie an Gold- und Platin-Isotopen beobachtet. Protonen und Neutronen verhalten sich dabei wie zwei getrennte Gruppen von Tänzern – wie zwei Tanzkurse, die im selben Saal üben. Die nukleare Supersymmetrie verknüpft darum nicht nur zwei Varianten, sondern sogar vier: Im ersten Fall haben beide Kurse einen überzähligen Tänzer (ungerade Anzahl an Protonen und Neutronen, kurz uu-Kerne), im zweiten und dritten Fall hat jeweils ein Kurs einen überzähligen Schüler (ungerade Anzahl an Protonen, gerade Neutronenzahl beziehungsweise umgekehrt, ug-Kerne und gu-Kerne), und im vierten Fall geht bei beiden Kursen die Zahl der Tänzer auf (gg-Kerne).

Der Atomkern ist ein faszinierendes Quantensystem, das noch viele Geheimnisse birgt und den experimentellen

nung der Energiezustände wird selbst mit modernen Hochleistungsrechnern zu kompliziert.

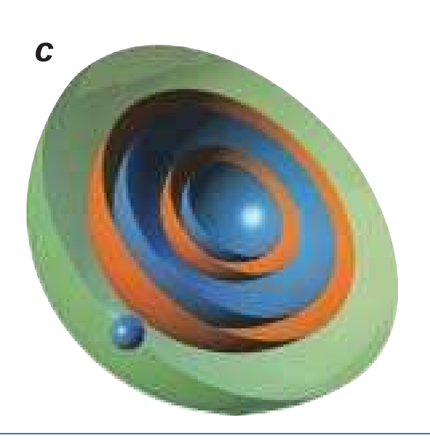
Das Tröpfchenmodell (*d*) eignet sich für schwere Kerne mit mehr als hundert Nukleonen. Es betrachtet den Kern als Tropfen einer Quantenflüssigkeit, der verschiedene Vibrationen und Rotationen ausführen kann. Die Eigenschaften des Kerns werden durch die Dichte und Oberflächenspannung des Tropfens ausgedrückt sowie durch die Verteilung der elektrischen Ladung innerhalb des Tropfens. Dieses Modell vermag besonders erfolgreich Atomkerne zu beschreiben, deren äußerste, nicht abgeschlossene Schale viele Nukleonen enthält.

Das „Modell der wechselwirkenden Bosonen" (*e*) betrachtet schwere Kerne mit geraden Anzahlen von Protonen und Neutronen als Ansammlungen von Nukleon-Paaren außerhalb einer abgeschlossenen Schale. Je zwei zu einem Paar verbundene Nukleonen – deren jedes ein Fermion ist – verhalten sich wie ein Boson.

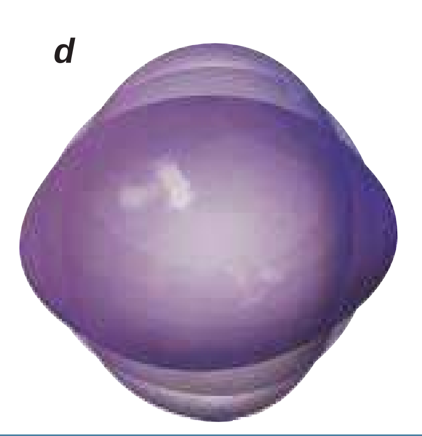
Um dieses Modell auf doppelt ungeradzahlige Kerne zu erweitern, wurde das Modell der „magischen Quadrate" entwickelt, das auf der supersymmetrischen Vertauschung von Bosonen und Fermionen beruht. Das im Artikel erwähnte magische Quadrat fasst vier Atomkerne zusammen, denen die gleiche Teilchenzahl zur Bildung abgeschlossener Schalen fehlt; dabei werden Nukleonenpaare (Bosonen) und einzelne Nukleonen (Fermionen) gleich behandelt.

Platin-194 hat 78 Protonen; zur Bildung einer vollen Schale mit 82 Protonen fehlen vier Protonen, das entspricht zwei Bosonen. Außerdem enthält der Kern 116 Neutronen, denen zur nächsten abgeschlossenen Schale (126 Neutronen) zehn Neutronen fehlen, das entspricht fünf Bosonen. Insgesamt fehlen also sieben Teilchen. Auch dem Nachbar-Isotop Platin-195 fehlen insgesamt sieben Teilchen zur Bildung voller Schalen: 78 Protonen bedeuten wie zuvor zwei Bosonen zuwenig, und den nunmehr 117 Neutronen fehlen neun Neutronen zur vollen Schale, das sind vier Bosonen plus ein Fermion – macht insgesamt sieben. Analoges gilt für Gold-195 (79 Protonen, 116 Neutronen) und Gold-196 (79 Protonen, 117 Neutronen).

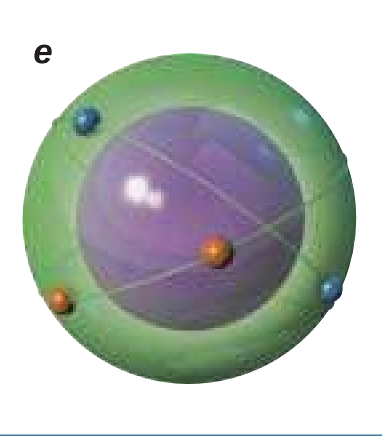
c



d



e



ALLE ABBILDUNGEN: BRIAN CHRISTIE DESIGN

Kernphysikern seit Jahrzehnten überraschende Entdeckungen beschert. Um alle Facetten der komplizierten Kernphysik zu verstehen, benutzen die Theoretiker eine Vielzahl unterschiedlicher Werkzeuge. Das neue Ergebnis liefert ihnen nun ein weiteres Instrument – und zeigt, dass Supersymmetrie nicht nur eine mathematische Kuriosität ist, sondern tatsächlich in der Natur vorkommt.

Mit den Werkzeugen der Kernforschung lassen sich zudem andere Quantensysteme verstehen, die Atomkernen ähneln: die so genannten endlichen Vielteilchen-Systeme. Sie bestehen – im Unterschied zu einem Festkörper – aus einer begrenzten Anzahl von Atomen oder Molekülen. Solche „mesoskopischen" Systeme aus einigen wenigen bis zu mehreren hundert Teilchen, angesiedelt im Grenzbereich zwischen Mikro- und Makrokosmos, können heute experimentell hergestellt und untersucht werden. Die Supersymmetrie dürfte auch in diesem Bereich eine wichtige Rolle spielen.

Alles Materielle in der Welt besteht aus Atomen – Elektronenwolken, die einen winzigen, aber massereichen Atomkern umgeben. Physiker und Chemiker verstehen inzwischen sehr gut, wie sich die Elektronen anordnen und wie die Eigenschaften der materiellen Welt aus diesen Strukturen hervorgehen. Die Details der Elektronen-Energieniveaus im Atom gehören zu den präzisesten Vorhersagen der Naturwissenschaften. Demgegenüber sind die Atomkerne bisher weitgehend rätselhaft geblieben.

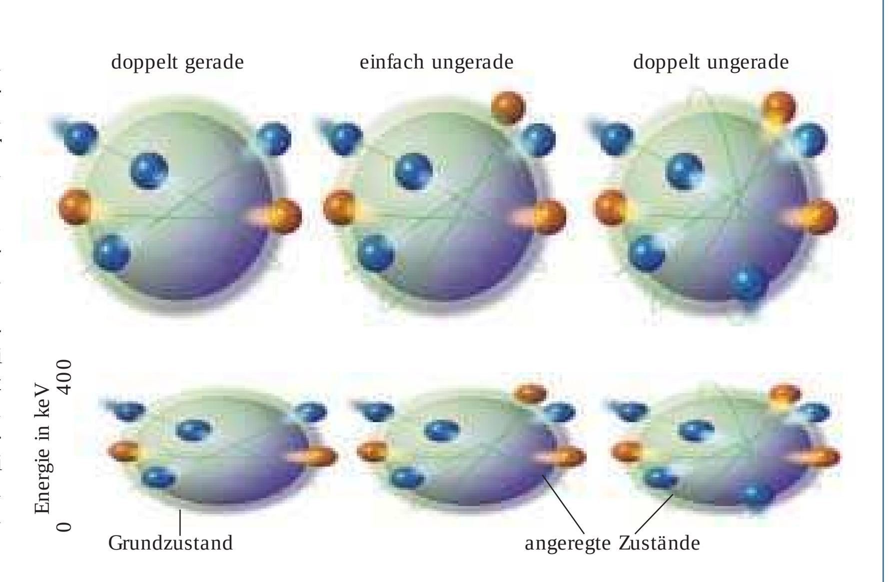
Starke Kräfte im Kern

Das liegt an der fundamental unterschiedlichen Art der Kräfte. Die Elektronen werden durch die relativ schwache elektromagnetische Kraft auf ihren Energieniveaus gehalten. Die im Atomkern dominierende Kraft ist hundertmal stärker – daher der Name starke Kraft. Mathematische Verfahren, welche das Verhalten eher schwacher Kräfte wie der elektromagnetischen erfolgreich beschreiben, versagen bei so starken Wechselwirkungen wie der Kernkraft. Außerdem sind die Elektronen Elementarteilchen ohne innere Struktur, während sich Protonen und Neutronen aus punktförmigen Teilchen – Quarks und Gluonen – zusammensetzen. Die zwischen den Nukleonen wirkende Kernkraft ist daher keine fundamentale Kraft wie der Elektromagnetismus, dessen Gleichungen wir genau kennen, sondern vielmehr Resultat vielfältiger Wechselwirkungen zwischen den Quarks und Gluonen.

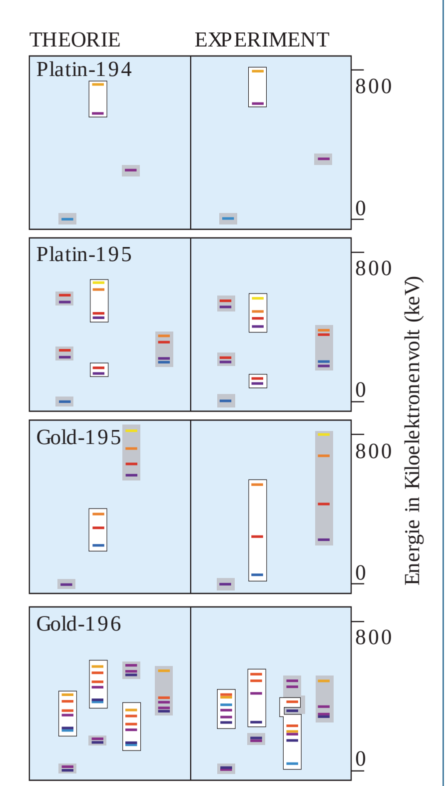
Die Kernkraft wirkt über wenige Femtometer (10^{-15} Meter) stark anziehend und fällt dann rapide auf null ab. Sie packt die Kernteilchen dicht zusammen, und jedes Nukleon steht in starker Wechselwirkung mit allen anderen in seiner Reichweite. Zum Vergleich: Die Elektronenbahnen liegen 10 000-mal weiter entfernt. Die resultierende Kernstruktur zählt zu den kompliziertesten Quantensystemen überhaupt, und jahrzehntelang haben die Theoretiker viele ▶

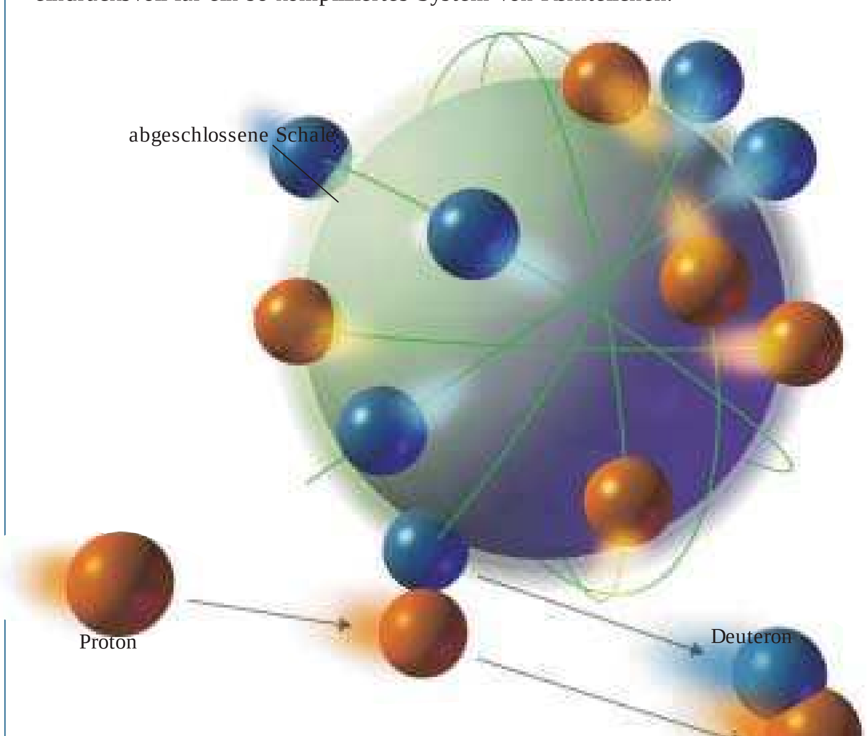
Messung von Kernzuständen

Die Energiespektren der Kerne hängen empfindlich davon ab, ob sie eine gerade oder ungerade Anzahl Protonen und Neutronen haben (rechts). Der Grund ist, dass sowohl die Protonen als auch die Neutronen im Kern gerne mit ihresgleichen Paare bilden. Beim einfachsten Kerntyp – dem doppelt geradzahligen – sind alle Protonen und alle Neutronen zu Paaren verbunden. Solche Kerne besitzen wenige angeregte Zustände bei niedrigen Energien. Bei einfach ungeradzahligen Kernen findet ein Kernteilchen keinen Partner, und das überzählige Nukleon führt zu weiteren Anregungszuständen. Da bei doppelt ungeraden Kernen ein Proton und ein Neutron übrig bleiben, wird die Situation noch komplizierter.



Nukleare Supersymmetrie zeigt sich bei den niedrigsten Energiezuständen von vier Atomkernen (rechts), die unter supersymmetrischen Gesichtspunkten ein „magisches Quadrat“ bilden. Die Farben bezeichnen die unterschiedlichen Drehimpulse der Zustände; diese sind der Supersymmetrie entsprechend in nebeneinander stehenden Gruppen angeordnet. Die Übereinstimmung zwischen Theorie (linke Spalte) und Experiment (rechte Spalte) ist zwar nicht exakt, aber eindrucksvoll für ein so kompliziertes System von Kernteilchen.





Transfer-Reaktionen liefern wichtige Daten über die angeregten Zustände von Gold-196 und ermöglichen damit den Nachweis der nuklearen Supersymmetrie. Bei einer typischen Transfer-Reaktion (oben) streift ein beschleunigtes Proton den Kern, entreißt ihm ein Neutron und entwischt als Deuteron. Der Target-Kern wird durch die Kollision in einen angeregten Zustand versetzt, dessen Energie sich direkt aus der Messung der Deuteron-Energie herleiten lässt.

Modelle entwickelt, um sie wenigstens näherungsweise zu beschreiben (siehe Kasten Seite 36/37). Einige Modelle behandeln den Kern als ein Tröpfchen aus Quantenflüssigkeit, das auf bestimmte Weise vibrieren und oszillieren kann. Andere kopieren das Modell, das sich so hervorragend für die Elektronenhülle bewährt hat: Die Nukleonen füllen nach und nach Schalen mit diskreten Energien auf, beginnend beim niedrigsten Energieniveau.

Die unterschiedlichen Modelle taugen am besten für bestimmte Klassen von Atomkernen – je nach der Gesamtzahl der beteiligten Nukleonen und je nachdem, wie voll die äußersten Schalen der Protonen und Neutronen sind. Da Protonen und Neutronen jeweils gern Paare mit ihresgleichen bilden, hängt das Verhalten des Kerns empfindlich davon ab, ob er eine gerade oder ungerade Anzahl von Protonen und von Neutronen besitzt (siehe Kasten links). Die gg-Kerne (gerade Anzahl sowohl von Protonen als auch von Neutronen) sind am einfachsten zu beschreiben, gefolgt von den ug- und gu-Kernen. Am schwierigsten zu modellieren sind die uu-Kerne (ungerade Protonen- und Neutronenzahl).

Symmetriebetrachtungen sind ein wichtiges und wirkungsvolles Verfahren, um solche Modelle zu entwickeln. Symmetrieprinzipien tauchen überall in der Physik auf – oft dort, wo man sie gar nicht erwartet. Zum Beispiel folgt der Energieerhaltungssatz aus der Zeitinvarianz der Naturgesetze, das heißt ihrer Symmetrie bezüglich Zeitverschiebung. Die Schalen der Elektronen wie auch die der Nukleonen unterscheiden sich durch Größen wie Drehimpuls und Parität, die mit Symmetrieprinzipien zusammenhängen: Die Drehimpulserhaltung folgt aus der Rotationsinvarianz – der Symmetrie bezüglich Drehungen –, und die Parität gibt Auskunft darüber, ob der Zustand eines Systems oder der Ablauf eines physikalischen Prozesses bei Spiegelung unverändert bleibt.

Eigenbrötlerische Fermionen, konformistische Bosonen

Auch die Gleichungen, die das Verhalten der Elementarteilchen beschreiben, enthalten fundamentale Symmetrien. Zu den wichtigsten Folgen gehört der strikte Gegensatz zwischen Bosonen und Fermionen mit ihren völlig unterschiedlichen Symmetrie- und Quanteneigenschaften. Fermionen gehorchen dem Pauli'schen Ausschließungsprinzip, dem zufolge zwei gleichartige Fermionen niemals zugleich denselben Quantenzustand belegen dürfen. Hingegen sind Bosonen geradezu erpicht, sich im selben Zustand zu drängeln.

Helium-4 ist ein Beispiel für ein zusammengesetztes Teilchen, das als Boson bei tiefen Temperaturen dem kollektiven Quantenzustand der Superflüssigkeit zustrebt. Es besteht aus sechs Fermionen: zwei Protonen, zwei Neutronen und zwei Elektronen. Die Kernteilchen selbst sind Fermionen, die sich wiederum aus drei fundamentalen Fermionen, den Quarks, zusammensetzen. Generell gilt, dass eine gerade Anzahl von Fermionen ein zusammengesetztes Boson ergibt, eine ungerade Anzahl dagegen ein zusammengesetztes Fermion.

Herkömmliche Symmetrien ordnen Fermionen und Bosonen jeweils immer nur ihresgleichen zu. Indem die Supersymmetrie Bosonen mit Fermionen verknüpft und umgekehrt, eröffnet sie eine neue Klasse von möglichen Beziehungen zwischen den Teilchen. Und die neuartige Mathematik, die in den supersymmetrischen Gleichungen steckt, erweitert die rechnerischen Möglichkeiten für die Beschreibung von Quantensystemen ganz enorm.

Symmetrie spielt auch die Schlüsselrolle im so genannten Modell wechselwirkender Bosonen (*Interacting Boson Model*), das Akito Arima von der Universität Tokio und Francesco Iachello – damals an der Universität Groningen in den Niederlanden – bereits Mitte der 1970er Jahre vorschlugen (siehe Kasten Seite 36/37). Dieses Modell betrachtet den Atomkern als ein Objekt aus Neutronen- und Protonen-Paaren, die sich wie Bosonen verhalten. Arima und Iachello fanden heraus, dass es in diesem Modell drei verschiedene Typen von gg-Kernen gibt, die jeweils mit einer bestimmten Symmetrie verknüpft sind. Zwei Kerntypen und die zugehörigen Symmetrien waren schon aus den älteren Tröpfchenmodellen bekannt und experimentell erforscht, aber die dritte Symmetrie war noch nie an Kernen beobachtet worden.

Einige Jahre später entdeckten Richard F. Casten und Jolie A. Cizewski, damals am Brookhaven National Laboratory in New Jersey, dass Platin-Kerne tatsächlich die neue Symmetrie zeigen. Das gab dem Modell wechselwirkender Bosonen großen Auftrieb; wie sich schon bald herausstellte, liefert es für viele Atomkerne eine gute Näherung.

Die von diesem Modell vorhergesagten Symmetrien gehören zu einem speziellen Typ, den so genannten dynamischen Symmetrien. Gewöhnliche, nichtdynamische Symmetrien ähneln denen, die uns aus dem Alltag vertraut sind wie die Spiegelsymmetrie zwischen linker und rechter Hand. Dynamische Symmetrien beziehen sich hingegen nicht auf die Objekte selbst, sondern auf die Gleichungen, die ihr dynamisches Verhalten beschreiben. Zum Leidwesen der Experimentalphysiker weist nur eine sehr begrenzte Klasse von Atomkernen dynamische Symmetrien auf.

Das Boson-Wechselwirkungsmodell eignet sich natürlich am besten für die doppelt geradzahligen gg-Kerne. Bei den einfach ungeradzahligen ug- oder gu-Kernen bleibt immer ein ungepaartes Nukleon übrig, gleichsam als unglückliches Mauerblümchen in einem Saal voller Tanzpaare. Das Modell behandelt einen solchen Atomkern als *n* Bosonen plus ein zusätzliches Fermion – das unpaarige Nukleon. In einigen Fällen lassen sich zwar auch solche Kerne mit dynamischen Symmetrien analysieren, aber das Verfahren ist viel aufwendiger als für gg-Kerne.

Dynamische Supersymmetrien

1980 schlug Iachello, mittlerweile an der Yale University, eine kühne Erweiterung des Modells vor, um ug/gu-Kerne mathematisch eleganter zu beschreiben. Er postulierte einen supersymmetrischen Zusammenhang zwischen dem aus *n* Bosonen plus einem Fermion bestehenden Atomkern und einem Kern mit $n + 1$ Bosonen. Falls diese dynamische Supersymmetrie in der Natur vorkommt, müssen die Energieniveaus eines ug/gu-Kerns und seines gg-Nachbarn ähnliche Strukturen aufweisen – zum Beispiel die angeregten Energiezustände von Arsen-75 (33 Protonen, 42 Neutronen) mit denen von Selen-76 (34 Protonen, 42 Neutronen).

Quantenzustände werden durch Quantenzahlen, etwa für den Drehimpuls, charakterisiert und in Gruppen geordnet. Im Rahmen der dynamischen Supersymmetrie würde ein einziger Satz von Quantenzahlen ausreichen, um die Zustände von zwei Atomkernen in verwandte Gruppen einzuordnen. Man könnte von den leichter berechenbaren Zuständen des doppelt geradzahligen Selen-76 ausgehen und die Zustände des ungeraden Arsen-75 vorhersagen – das heißt deren Drehimpulse und ungefähre Energien.

Während der 1980er Jahre sammelten die Experimentalphysiker zwar Kandidaten für dynamische Symmetrien und fanden Hinweise auf Supersymmetrie, aber sie konnten Iachellos Idee nicht zweifelsfrei beweisen. Die Struktur eines ug-Kerns ließ sich nicht vollständig aus den Eigenschaften des assoziierten gg-Kerns herleiten.

Supersymmetrie in der Teilchenphysik

Von Photinos und Selektronen

Im Standardmodell der Teilchenphysik sind sämtliche Partikel, aus denen die Materie besteht, Fermionen: insbesondere die Quarks und Elektronen, aber auch exotische Teilchen wie das Myon, das Tau oder die Neutrinos. Hingegen sind alle Teilchen, die Kräfte übertragen, Bosonen: die Photonen, Gluonen, W- und Z-Teilchen sowie die hypothetischen Gravitonen und Higgs-Teilchen.

Symmetrien bilden die Grundlage des Standardmodells. So sind das Elektron und das zugehörige Neutrino über eine Symmetrie verknüpft, die auch das *up*- und das *down*-Quark verbindet. Ein anderer Ausdruck dieser Symmetrie ordnet dem Z-Boson das W-Boson zu. Gluonen unterliegen der Farb-Symmetrie, die auch für die verschiedenen „Farben" gilt, in denen Quarks auftreten können. Doch keine dieser Symmetrien überwindet die grundlegende Trennung zwischen Fermionen und Bosonen – dafür verhalten sich die Quantenzustände der beiden Partikelsorten allzu unterschiedlich.

Dieser Unterschied tritt zu Tage, wenn in einem Mehrteilchen-Quantenzustand zwei identische Teilchen vertauscht werden: Handelt es sich dabei um zwei Bosonen, bleibt der Gesamtzustand unverändert. Doch beim Vertauschen zweier Fermionen wechselt der Zustand sein Vorzeichen; die Folge ist das Pauli-Prinzip, das Fermionen verbietet, identische Zustände einzunehmen.

Um die Teilchenphysik zu vereinheitlichen und mit Einsteins Relativitätstheorie zu verbinden, wurde in den 1970er Jahren die Supersymmetrie entwickelt. Sie fügt jedem Teilchen eine weitere fermionische Komponente hinzu, die ausreicht, um Fermionen und Bosonen auszutauschen. Damit die uns vertrauten Elementarteilchen der Supersymmetrie genügen, benötigen sie jeweils einen „Superpartner" – jedes Boson braucht sein fermionisches Gegenstück und umgekehrt.

Da die bislang entdeckten Teilchen nicht die richtigen Eigenschaften besitzen, um füreinander solche Partner zu sein, müssen weitere Teilchen existieren – das Standardmodell wird zum supersymmetrischen Standardmodell erweitert. Die postulierten fermionischen Teilchen tragen die Namen Photino, Gluino, Wino, Zino, Gravitino und Higgsino. Der Name der bosonischen Superteilchen ergibt sich, indem man dem Namen ihres Partners ein „s" hinzufügt: Selektron, Smyon, Sneutrino, Squark. Keines dieser Teilchen wurde bisher entdeckt.

Die Supersymmetrie der Elementarteilchenphysik erweitert außerdem die Raum-Zeit-Symmetrien, die Einsteins Relativitätstheorie zugrunde liegen. Hingegen hat die nukleare Supersymmetrie überhaupt keinen Bezug zur relativistischen Raum-Zeit, sondern stellt nur Relationen zwischen unterschiedlich aufgebauten Atomkernen her. Die Gemeinsamkeit der beiden Formen von Supersymmetrie besteht darin, dass sie Fermionen mit Bosonen mit Hilfe der gleichen Transformation vertauschen.

1984 entwickelten Piet Van Isacker, Kristiaan L. G. Heyde und ich – damals alle an der Universität Gent in Belgien – gemeinsam mit Alejandro Frank von der Universität von Mexiko eine Erweiterung von Iachellos Supersymmetrie. Unser Modell ermöglicht es, ein Quartett aus vier Atomkernen – ein so genanntes magisches Quadrat – in einem gemeinsamen Rahmen zu beschreiben.

Wir beginnen mit einem gg-Kern, dessen Nukleonen – Protonen wie Neutronen – gepaart sind, der also nach dem Boson-Wechselwirkungsmodell vollständig aus Bosonen aufgebaut ist. Supersymmetrische Transformationen, die ein Boson gegen ein Fermion austauschen, liefern einen ug-Kern (bei Austausch eines Protonenpaars) und einen gu-Kern (bei Austausch eines Neutronenpaars). Werden sowohl ein Protonen- als auch ein Neutronenpaar durch Fermionen ersetzt, ergibt sich ein – doppelt ungerader – uu-Kern.

Für Untersuchungen der Kernstruktur bei niederen Energien sind schwere uu-Kerne mit mehr als hundert Nukleonen die schwierigsten Objekte. Doch wenn die neue dynamische Supersymmetrie in der Natur verwirklicht ist, lässt sich das Energiespektrum des uu-Kerns in einem magischen Quadrat aus den einfacheren Spektren seiner drei Partner ableiten. Der experimentelle Nachweis eines solchen Zusammenhangs ist nicht nur für die Kernphysik wichtig, sondern auch für alle anderen Anwendungen der Supersymmetrie: Ihr mangelt es – obschon von Theoretikern eifrig benutzt – an experimenteller Bestätigung.

Um diese Ideen zu untermauern, benötigten die Wissenschaftler genaue Kenntnisse von schweren uu-Kernen. Viele experimentelle und theoretische Arbeitsgruppen begannen daher weltweit

mit entsprechenden Untersuchungen. Sie fanden zwar gewisse Indizien für Supersymmetrie, aber der „heilige Gral" – eine detaillierte Karte der Energiezustände von Gold-196 – blieb unerreicht. Dieser doppelt ungerade Kern aus 79 Protonen und 117 Neutronen gilt aus mehreren Gründen als einer der entscheidenden Tests für die Supersymmetrie in der Kernphysik: So weiß man, dass Kerne aus diesem Bereich (rund 80 Protonen und 120 Neutronen) dynamische Symmetrien aufweisen und gute Kandidaten für Supersymmetrie sind. Insbesondere bieten die Atomkerne von Platin-194 (gg), Platin-195 (gu), Gold-195 (ug) und Gold-196 (uu) die idealen Voraussetzungen für ein „magisches Quadrat". Und schließlich sagten wir 1989 mittels Supersymmetrie zahlreiche Zustände von Gold-196 voraus, die damals noch gar nicht gemessen worden waren – das heißt, neue Experimente konnten die Theorie beweisen oder zu Fall bringen.

Die Physiker bombardieren Atomkerne mit Neutronen oder künstlich beschleunigten Teilchen, um ihr Verhalten zu studieren. Der durch den Stoß angeregte Atomkern kehrt schnell über eine Kaskade von instabilen Zuständen in den Grundzustand zurück; bei jedem Übergang sendet er kurzwellige Gamma- oder Röntgenstrahlung aus, deren Energie der Differenz zwischen den beiden Niveaus entspricht und sehr genau gemessen werden kann.

Das Spektrum eines doppelt ungeraden Kerns ist wegen seiner zahlreichen dicht benachbarten Energiezustände viel komplexer als das eines einfach ungeraden oder doppelt geraden Kerns. Das Gold-196-Isotop wartet mit zusätzlichen Schwierigkeiten auf: Es ist radioaktiv und zerfällt binnen einer Woche, wobei es sich meist durch Einfang eines Elektrons – dabei geht ein Proton in ein Neutron über – in Platin-196 umwandelt. Experimentalphysiker müssen das Isotop also ständig neu erzeugen, indem sie stabile Gold-197-Kerne mit energiereichen Protonen beschießen.

Die Schwierigkeit, die Struktur von Gold-196 aus diesen Messungen abzuleiten, erwies sich als so groß, dass einige Gruppen das Unterfangen aufgaben. Ein Team zog aus den experimentellen Daten sogar den Schluss, die dynamische Supersymmetrie sei gebrochen. An diesem Tiefpunkt schlossen sich Mitte der 1990er Jahre meine Gruppe von der Universität Fribourg (Schweiz), die Gruppe von Christian Günther an der Universität Bonn und die von Gerhard Graw an der Universität München zu einer neuen Kollaboration zusammen. Später unterstützte uns auch noch die Gruppe von Richard F. Casten von der Yale University. Wir planten einen letzten Versuch, die Kernstruktur von Gold-196 aufzuschlüsseln, und zwar mittels der so genannten Spektroskopie im Strahl; dabei wird die Strahlung von Gold-196-Ionen gemessen, die in einem Teilchenstrahl erzeugt werden. Wir benutzten drei Beschleunigeranlagen: das Philips-Zyklotron am Paul-Scherrer-Institut in der Schweiz, das Zyklotron der Universität Bonn und den Tandem-Beschleuniger in Yale.

Aufschlussreiche Transfers

Graws Gruppe führte ein so genanntes Transfer-Experiment aus, das die Gamma-Spektroskopie im Strahl wirkungsvoll ergänzte. Bei einem Transfer-Experiment trifft das Projektil den Target-Kern und entwendet ihm eines seiner Nukleonen. Zurück bleibt ein angeregter Tochterkern (siehe Kasten Seite 38). Das auslaufende Teilchen wird in einem Detektor registriert und seine Energie bestimmt. Aus der Energiebilanz kann dann auf die Anregungsenergie des Tochterkerns geschlossen werden.

Transfer-Experimente liefern andere Daten als die Gamma-Spektroskopie: Sie ergeben direkt die Energie der angeregten Zustände anstelle der vielen Energiedifferenzen zwischen den einzelnen Niveaus. Wenn der Kern mit polarisierten Teilchen beschossen wird, lassen sich außerdem die Drehimpulse der angeregten Zustände aus den Streuwinkeln der Stoßprodukte bestimmen.

Um die sehr eng benachbarten Energieniveaus von Gold-196 aufzulösen, benutzten wir das magnetische Q3D-Spektrometer am Beschleunigerzentrum der Universität München. Bei der Analyse der Transfer-Experimente entdeckten Alexander Metz und seine Mitarbeiter in München, dass der Grundzustand dieses Isotops ein Dublett aus zwei sehr dicht benachbarten Energiezuständen ist. Diese Beobachtung löste die Probleme, an denen die Analyse der Kernzustände mittels Gamma-Spektroskopie zuvor gescheitert war. Die spektroskopischen Untersuchungen lieferten außerdem die Energien der meisten angeregten Zustände. Davon ausgehend konnten wir nun aus den Daten Drehimpuls und Parität jedes angeregten Zustands bestimmen.

Die Resultate stimmten gut mit den Vorhersagen der dynamischen Supersymmetrie überein (siehe Kasten Seite 38). Die Zustände aller vier Kerne des magischen Quadrats aus Platin-194, Platin-195, Gold-195 und Gold-196 können in einem gemeinsamen Satz von supersymmetrischen Quantenzahlen zusammengefasst werden, und ein einziger mathematischer Ausdruck mit nur sechs Parametern liefert recht genau die Energien von fast hundert angeregten Zuständen. Dass dies bei einem der kompliziertesten Atomkerne gelingt, bedeutet eine überzeugende Bestätigung der Theorie – aber auch eine neue Herausforderung. Gold-196 kann als Spezialfall eines aus vielen wechselwirkenden Quantenteilchen zusammengesetzten Objekts betrachtet werden. Die theoretischen Physiker möchten nun unter diesem Gesichtspunkt einer Quanten-Vielkörpertheorie erklären, warum die Anregungen von Gold-196 der dynamischen Supersymmetrie gehorchen. Verschiedene Forschergruppen arbeiten intensiv an dieser Frage.

Fermionen-Paare, die sich wie Bosonen verhalten, treten in vielen Bereichen der Physik auf, etwa in der Supraleitung. Auch dort könnte sich – ähnlich wie in Atomkernen – die dynamische Supersymmetrie als nützlich erweisen. Eines ist sicher: Symmetrien, ob „super", „dynamisch" oder ganz normal, werden weiterhin den Tanz der Quantenteilchen dirigieren. ■



Jan Jolie *promovierte 1986 an der Universität Gent (Belgien) in theoretischer Kernphysik. Danach forschte er fünf Jahre am Institut Laue Langevin in Grenoble (Frankreich). Im Jahr 1992 wechselte er an die Universität Fribourg (Schweiz) und befasste sich – abgesehen von den im Artikel geschilderten Experimenten – auch mit Gamma- und Neutronen-Tomografie sowie dem Bau von abstimmbaren Gamma-Quellen. Gegenwärtig leitet er das Institut für Kernphysik der Universität zu Köln.*

Literaturhinweise

Supersymmetrie bei Atomkernen. Von G. Graw et al. in: Physik in unserer Zeit, Bd. 29, S. 264 (1999).

Supersymmetrie in komplexen Spektren. Von Peter Ring in: Physikalische Blätter, Heft 11, S. 13 (1999).

Nuclear Structure of ^{196}Au: More Evidence for Its Supersymmetric Description. Von J. Gröger et al. in: Physical Review C, Bd. 62, S. 64304 (2000).

Supersymmetry Stands the Test. Von P. V. Isacker in: Physics World, Bd. 12, S. 19 (1999).

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis".*

PALÄOANTHROPOLOGIE

Ältester Vorfahr des Menschen?

Stürmt es in der Südsahara, freuen sich die Paläontologen. Denn der Wind legt manchmal neue Fossilien frei. Mit seiner Hilfe fand Michel Brunet von der Universität Poitiers in der Dschurab-Wüste im Norden des Tschad jetzt einen Schädel, der von einem sehr frühen Vorfahren des Menschen stammen könnte. Der Hinterkopf ähnelt zwar eher dem eines Schimpansen, doch deuten Merkmale wie der relativ flache Gesichtsschädel und die kleinen Eckzähne auf einen menschlichen Vorfahren hin. Der Vergleich mit Tierfossilien in derselben Schicht ergibt ein Alter von sechs bis sieben Millionen Jahren. Demnach lebte *Sahelanthropus tchadensis*, wie der Neuzugang in der Ahnengalerie des Menschen getauft wurde, noch vor dem ältesten bisher bekannten Hominiden: *Orrorin tugenensis*, von dem vor zwei Jahren einige etwa sechs Millionen Jahre alte Zähne gefunden wurden. Das eigentlich Sensationelle an dem neuen Schädel aber ist sein Fundort in der Mitte des Schwarzen Kontinents: Er widerlegt die bisher gängige Theorie von Ostafrika als der Wiege der Menschheit – liegt er doch 2500 Kilometer entfernt – und wirft die Frage neu auf, wann genau und warum sich unser Stammbaum von dem der Affen abspaltete. *(Nature, 11.7.2002, S. 145)*



IRM POITOU CHARENTES / EMPA UNIVERSITÄT ZÜRICH

Sechs bis sieben Millionen Jahre alt ist der Schädel von *Sahelanthropus tchadensis*.

MIKROBIOLOGIE

Poliovirus aus dem Baukasten

Man nehme kurze Ketten aus Nucleotiden, den Bausteinen der Erbsubstanz DNA, hänge sie aneinander und gebe das entstehende Genmaterial in eine geeignete Enzymlösung – fertig ist das Virus! Doch: So erschreckend einfach ist es, wie Jeronimo Cello und seine Kollegen an der State University of New York nun bewiesen, den Erreger der Kinderlähmung aus seinen chemischen Bestandteilen künstlich zusammenzubauen. Anhand kleiner Veränderungen, welche die Wissenschaftler in der Erbsubstanz vornahmen, konnten sie ihr synthetisches Produkt von der natürlich vorkommenden Form unterscheiden. Mit ihm infizierte Mäuse zeigten die typischen Lähmungserscheinungen. Die Poliomyelitis ist weltweit fast ausgerottet, und nach erfolgreichem Abschluss des Eradikationsprogrammes soll die Impfung dagegen – wie bei den Pocken schon geschehen – beendet werden. Cello warnt nun, dass dadurch Terroristen eine Waffe in die Hand bekommen könnten. Eine Rekonstruktion des gefährlicheren Pockenvirus durch Verbrecher halten Experten allerdings für unwahrscheinlich, da dieses viel komplizierter aufgebaut ist als der Polio-Erreger. *(Science express; doi: 10.1126/science.1072266)*

PHYSIK

Flüssiges Licht

Prallt der Laserstrahl gegen eine Wand, zerstiebt er in eine Vielzahl leuchtender Tröpfchen – ganz so, als wäre er aus Wasser. Lässt sich Licht tatsächlich verflüssigen? Im Computer ist dies Physikern um Huberto Michinel von der Universität Vigo (Spanien) jedenfalls jetzt gelungen. Wie sie zeigten, nimmt ein simulierter Laserstrahl unter bestimmten Bedingungen Eigenschaften einer Flüssigkeit an. Dazu muss er sich in einem optisch nichtlinearen Medium ausbreiten. Ein solches Material bremst Strahlung umso stärker ab, je intensiver diese ist. Das energiereiche Licht eines Lasers kann nach den Berechnungen der Spanier den Brechungsindex des Mediums so weit verändern, dass es wie eine Linse wirkt und das „Photonengas“ schließlich kondensieren lässt. Dann besitzt es genau wie eine Flüssigkeit eine Oberflächenspannung und bildet beispielsweise Wirbel (Bild). Sollte es gelingen, Lichttropfen auch real herzustellen, gäben sie ideale Informationsbits in optischen Computern ab. *(Physical Review, E65, 066604)*



Simuliertes flüssiges Licht kann auch Wirbel bilden.

PHYS. REV E 65 066604 / UNIVERSIDADE DE VIGO

ARCHÄOLOGIE

Frühe Kakao-Trinker

Schokolade ist unwiderstehlich – und das bereits seit Jahrtausenden. Rückstände in Keramikgefäßen der Mayas belegen nun, was sich bisher nur indirekt aus Sprachanalysen ableiten ließ: Die Menschheit kannte den Kakao als Genussmittel schon lange vor dem Beginn unserer Zeitrechnung. Ein Team um W. Jeffrey Hurst von der Universität von Texas in Austin und der Schokoladenfirma Hershey im US-Bundesstaat Pennsylvania wies in 2600 Jahre alten Kannen aus Maya-Gräbern bei Colha im Norden von Belize Spuren von Theobromin nach. Die Kakao-Pflanze enthält als einziges Gewächs Mittelamerikas diese Substanz in großen Mengen. Theobromin wirkt ähnlich aufputschend wie das in Kaffee und Tee enthaltene Koffein. Die Mayas verwendeten den Kakao allerdings nicht für feste Schokolade, wie wir sie heute kennen. Hauptsächlich genossen sie ihn als Zusatz zu Getränken, aber auch zusammen mit Mais, Chili oder Honig. Bislang stammten die ältesten Kakao-Reste, gefunden in der Maya-Stätte Rio Azul in Guatemala, aus dem fünften Jahrhundert *(Nature, 18.7.2002, S. 289)*



HERSHEY FOODS COOPERATION

Diese 2600 Jahre alte Kanne aus einem Maya-Grab enthält bereits Kakao-Spuren.

ASTRONOMIE

Hitziger Whirlpool

Wegen seiner wunderbar gleichmäßig geschwungenen Spiralarme ist M51 – besser bekannt unter dem Namen Whirlpool-Galaxie – eines der am meisten bewunderten Objekte am nördlichen Himmel. Doch erst das Röntgenteleskop Chandra entdeckte jetzt die Quelle, die den Whirlpool im Zentrum aufheizt. M51 besteht in Wahrheit aus zwei miteinander verbundenen Galaxien, von denen die größere die namensgebenden Spiralarme trägt. Um ihren Kern zeigten sich im Röntgenbild nun zwei riesige Gaswolken mit Temperaturen von mehreren Millionen Grad. Erhitzt werden sie von Materiejets, die ein Schwarzes Loch im Zentrum der Galaxie aussendet. Zudem sind in dem Chandra-Bild die Überreste einer Supernova vom seltenen Typ Ic zu erkennen, die im Jahre 1994 in der Whirlpool-Galaxie stattfand. Es handelt sich um die Hülle aus Wasserstoff und Helium, die der sterbende Stern einige Jahrtausende vor seiner Explosion bereits abgestoßen hatte. Sie hat sich inzwischen auf einen Durchmesser von 0,2 Lichtjahren aufgebläht. Aufgeheizt von den Stoßwellen der Supernova-Explosion, die jetzt erst bei ihr eintreffen, leuchtet sie im hochenergetischen Röntgenbereich. *(Nasa 1.7.2002)*



NASA / AURA / STSCI / HUBBLE HERITAGE TEAM

M51: Schönheit mit heißem Herzen

ZOOLOGIE

Schlange mit Appetit auf Häppchen



BRUCE C. JAYNE / UNIVERSITY OF CINCINNATI AND THE FIELD MUSEUM OF NATURAL HISTORY, CHICAGO

Als einzige Schlange zerlegt *Gerarda prevostiana* ihre Beute in genießbare Häppchen.

Die Krabbe fest im Maul, windet die Wasserschlange den vorderen Teil ihres Körpers in Form einer Schlaufe um ihr Opfer und reißt mundgerechte Stücke von ihm ab. Dazu zieht sie ihren Kopf durch die Schlinge, mit der sie die Beute festhält. Mit dieser ungewöhnlichen Technik zur Nahrungsaufnahme steht *Gerarda prevostiana* in ihrer Verwandtschaft alleine da: Schlangen verschlingen ihre Beute sonst am Stück – dank ihres beweglichen Kiefers können sie das Maul weit aufreißen und sich auch große Tiere einverleiben. Aber mit noch so akrobatischen Kieferverrenkungen wären Krabben für *G. prevostiana* eine Nummer zu groß. Mit ihrem Knotentrick, den Bruce C. Jayne von der Universität Cincinnati per Infrarotkamera entdeckte, hat sie einen eleganten Ausweg gefunden. Dafür muss sie eine Einschränkung hinnehmen: Sie kann sich nur an frisch gehäuteten Tieren gütlich tun, die noch eine weiche Schale haben. *(Nature, 11.7.2002, S. 143)*

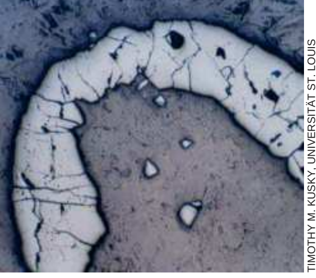
GEOLOGIE

Uralter Erdmantel

Kein Bestandteil der festen Erdschale ist vergänglicher als die ozeanische Kruste. Aus aufquellendem Magma inmitten der Weltmeere erstarrt, wandert sie zu den Rändern der Kontinente, taucht unter sie ab und löst sich im Erdmantel wieder auf. Alte ozeanische Kruste zu erforschen wäre deshalb unmöglich, hätte sich nicht gelegentlich ein Stück davon über einen Kontinentalrand statt darunter geschoben. In diesem Fall bleibt der einstige Meeresboden als so genannter Ophiolith-Komplex erhalten – und liefert den Beweis dafür, dass auch zur Zeit seiner Entstehung bereits ein Recycling der Erdkruste und damit Plattentektonik stattfand. Vor zwei Jahren entdeckten Forscher nordöstlich von Peking den ältesten bekannten Ophiolithen, der sich vor 2,5 Milliarden Jahren gebildet hat – 500 Millionen Jahre früher als der bis dahin gültige Rekordhalter. Nun machte Jianghai Li von der Universität Peking eine noch sensationellere Entdeckung: An der Unterseite des Ophiolithen stießen er und seine Kollegen auf ein hundert Kilometer langes Stück ehemaligen Erdmantels. Es enthält das Mineral Chromit in einer typisch deformierten Form, wie sie von aufsteigendem Magma erzeugt wird – ein Schnappschuss der Plattentektonik aus einer Zeit, als die Erde halb so alt war wie heute. *(GSA Today, Bd. 12, S. 4)*



Deformierte Chromit-Minerale (hell) zeugen vom Magma-Aufstieg aus dem Erdmantel vor 2,5 Milliarden Jahren.



TIMOTHY M. KUSKY, UNIVERSITÄT ST. LOUIS

INTELLIGENZ

Inselbegabungen

Der einfache Alltag mag autistische oder geistig behinderte Menschen überfordern. Doch verblüffenderweise brillieren manche mit einem phänomenalen Gedächtnis und genialen künstlerischen Fähigkeiten.



Kim Peek war das Vorbild für die Figur des autistischen Raymond Babbitt in dem Kinofilm *Rain Man*.

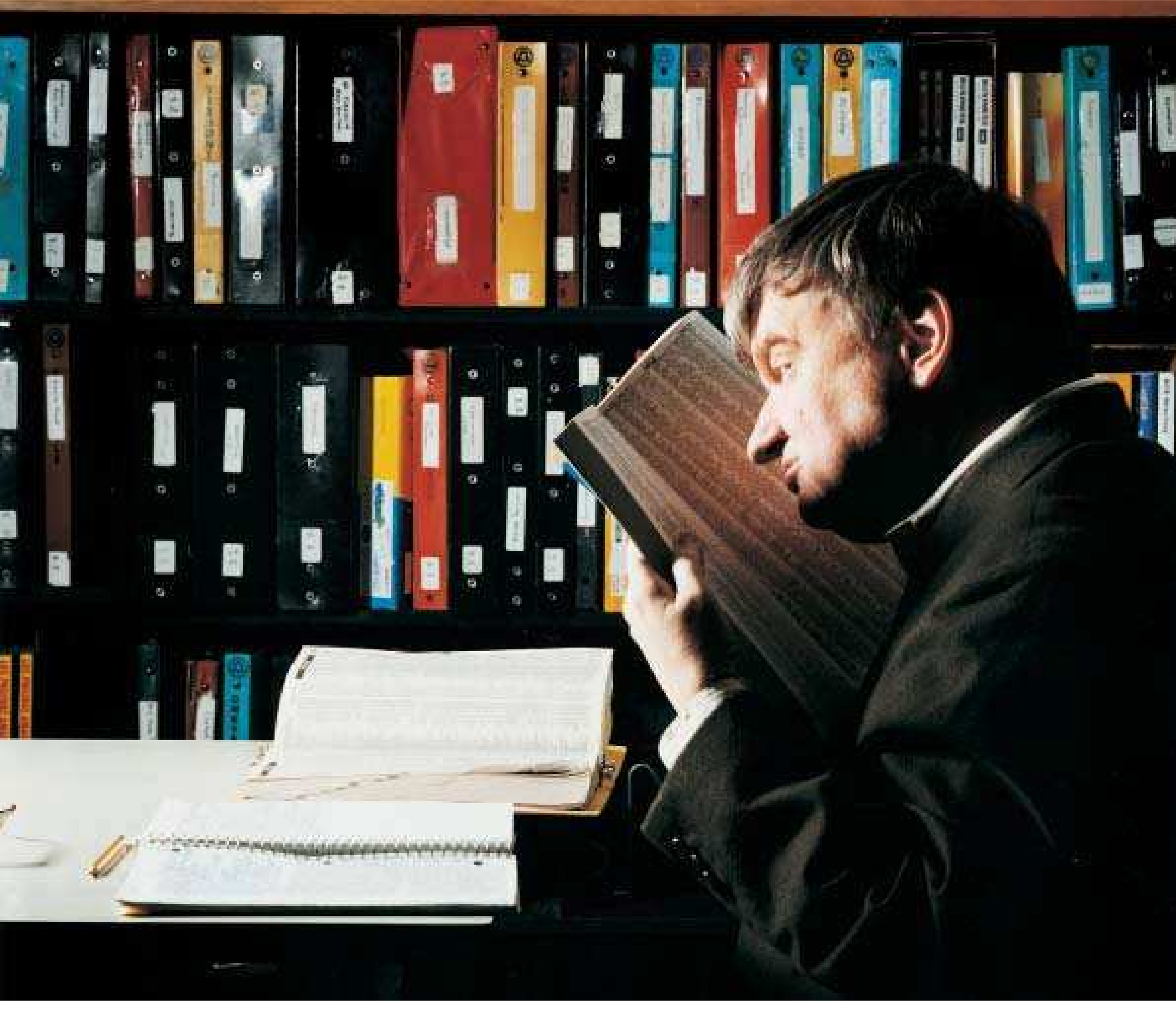
ALLE FOTOS: ETHAN HILL

Von Darold A. Treffert und Gregory L. Wallace

Leslie Lemke ist Pianist. Mit 14 Jahren spielte er Tschaikowskys Klavierkonzert Nr. 1 fließend und ohne jeden Fehler, nachdem er es einige Stunden zuvor das erste Mal in seinem Leben im Fernsehen gehört hatte. Niemals hatte er auch nur eine Klavierstunde genommen – und dabei ist es bis heute geblieben. Lemke ist blind, geistig retardiert und hat eine zerebrale Lähmung. Dennoch singt und spielt er tausende Stücke, gibt Konzerte in seiner Heimat USA und im Ausland. Darüber hinaus improvisiert und komponiert er.

Die Kunstwerke des Schotten Richard Wawro genießen internationales Renommee. Zu den Sammlern gehören sogar Margaret Thatcher und Papst Johannes Paul II. Ein Londoner Kunstprofessor war „wie vom Donner gerührt", als er die Ölkreidezeichnungen sah, die Wawro als Kind gemalt hatte. Er bezeichnete sie als „phänomenale Arbeiten, ausgeführt mit der Präzision eines Technikers und dem Weltblick eines Poeten". Wawro ist autistisch.

Kim Peek ist ein wandelndes Lexikon. Mehr als 7600 Bücher kennt er auswendig. Er kann für jede US-amerikanische Stadt und jeden Landkreis die dorthin führenden Highways benennen, inklusive der dazugehörigen Vorwahlnummern, Postleitzahlen, Fernsehsender und Telefongesellschaften. Wer ihm das Geburtsdatum verrät, erfährt sogleich den jeweiligen Wochentag, ebenso den Wochentag, an dem man 65 Jahre alt wird „und sich zur Ruhe setzen kann". Peek erkennt die meisten klassischen Musikstücke und weiß sowohl das Datum der Erstaufführung oder -veröffentlichung wie auch den Geburtsort des Komponisten nebst dessen Geburts- und Sterbetag. Auch Peek ist geistig retardiert, bei vielen grundlegenden Verrichtungen des Alltags deshalb auf seinen Vater angewiesen. Seine außergewöhnlichen Fähigkeiten lieferten die Inspiration für die



Über 7600 Bücher kennt Kim Peek in- und auswendig. Außerdem beherrscht er – trotz seiner geistigen Behinderung – alle Vorwahlnummern, Highways, Postleitzahlen und Fernsehsender in den gesamten USA.

Figur des Raymond Babbitt, den Dustin Hoffman 1988 in dem Kinoerfolg *Rain Man* spielte.

Drei Schicksale – eine Gemeinsamkeit: Lemke, Wawro und Peek verfügen über ungewöhnliche, ja spektakuläre, aber auf wenige Gebiete begrenzte Inselbegabungen, die in frappierendem Gegensatz zu ihren geistigen Entwicklungsstörungen, inklusive Autismus, stehen. Fachleute sprechen vom Savant-Syndrom. Mindestens die Hälfte aller bekannten Fälle ist autistisch, die übrigen weisen andere Entwicklungsstörungen auf. Anteilig betrachtet: Bei etwa jedem zehnten autistischen Menschen und ungefähr bei einer von 2000 Personen mit Hirnschädigung oder geistiger Retardation treten Inselbegabungen auf.

Noch erscheint vieles am Savant-Syndrom rätselhaft. Doch die Fortschritte bei den bildgebenden Verfahren, die sogar Hirnprozesse sichtbar machen, erlauben nun eine umfassendere Beschreibung. Zugleich stützen die Ergebnisse eine lange diskutierte Theorie, wonach eine Schädigung der linken Hirnhälfte mitspielt. Noch faszinierender sind Berichte über plötzlich auftretende Inselbegabungen bei Menschen mit bestimmten Formen der Demenz. Vielleicht schlummert in jedem von uns ein bisschen von diesem Genie?

Bereits 1789 erschien eine Beschreibung des Savant-Syndroms in der wissenschaftlichen Literatur. Benjamin Rush, der „Vater der amerikanischen Psychiatrie“, schilderte darin die Fähigkeiten von Thomas Fuller, blitzschnell im Kopf zu rechnen. Obwohl Fuller von der Mathematik kaum mehr verstand als simples Zählen, gab er auf die Frage, wie viele Sekunden ein Mensch im Alter von 70 Jahren, 17 Tagen und 12 Stunden bereits gelebt hat, innerhalb von anderthalb Minuten die richtige Antwort: 2210500800 Sekunden – unter Berücksichtigung von 17 Schaltjahren.

Erst 1887 wurde die bemerkenswerte Koexistenz fehlender und überragender Fähigkeiten ausführlicher erörtert. Damals beschrieb J. Langdon Down – bekannt vor allem für die Erkennung ▶

Autismus und Inselbegabung

Seit dem Film *Rain Man* mit Dustin Hoffman als autistischem Raymond Babbitt ist diese Entwicklungsstörung einem breiteren Publikum vertraut. Erstmals beschrieben wurde sie 1943 von Leo Kanner an der Psychiatrischen Kinderklinik der Johns-Hopkins-Universität in Baltimore (Maryland).

Seine elf jungen Patienten hatten gewisse Eigenschaften gemein:
- Sie sonderten sich von der Außenwelt ab,
- wiederholten beispielsweise stereotyp einfache Laute, Sätze und Bewegungen,
- sträubten sich gegen jede Veränderung ihres gewohnten Umfeldes,
- besaßen merkwürdig eingeschränkte Interessen,
- neigten zu regelrecht ritualisierten Routinen,
- zeichneten sich durch Fähigkeiten aus, die angesichts der Defizite bemerkenswert erschienen. Kanner sprach von Inselbegabungen.

Als Heranwachsende gelang es einigen, sich sozial recht gut anzupassen. Dennoch blieben ihre Interessen eingeengt, ihre Fähigkeit zur Kommunikation und zu zwischenmenschlichen Beziehungen beeinträchtigt.

des nach ihm benannten Down-Syndroms, früher auch Mongolismus genannt – zehn Menschen mit Inselbegabungen. Diese bemerkenswerten Personen hatte er während seiner dreißigjährigen Tätigkeit als Direktor des Earlswood-Heimes in London kennen gelernt. Er prägte den Begriff des *idiot savant*: eine Kombination aus der damals akzeptierte Klassifikation des „Idioten“, als Menschen mit einem Intelligenzquotienten von weniger als 25, und einem Abkömmling des französischen Wortes *savoir* für „wissen“.

Inzwischen sind etwa hundert „Inselbegabte“ fachlich beschrieben. Daher wissen wir, dass solche Menschen im Allgemeinen einen Intelligenzquotienten zwischen 40 und 70 besitzen – vereinzelt aber auch bis zu 114 Punkte erreichen. Das männliche Geschlecht dominiert bei Inselbegabung; auf eine Frau kommen vier bis sechs Männer. Das Syndrom kann angeboren sein, tritt aber beispielsweise auch nach einer Hirnhautentzündung oder Hirnverletzung auf.

Das Repertoire herausragender Fähigkeiten ist meistens beschränkt. Gewöhnlich betrifft es Talente der rechten Hirnhälfte, also vornehmlich nichtsymbolische, künstlerische, visuelle und motorische Begabungen. Dazu gehören Musik, bildende Kunst, Rechenfertigkeiten sowie eine Reihe weiterer Fähigkeiten, zum Beispiel mechanischer oder räumlicher Art. Im Gegensatz dazu steht die linke Hirnhälfte für Fähigkeiten, die eher sequenziell, logisch und symbolisch sind, darunter Sprache und Sprechen.

Die meisten Menschen mit musikalischer Inselbegabung besitzen ein absolutes Gehör und spielen mit verblüffender Leichtigkeit Musikinstrumente, überwiegend Klavier. Einige sind sogar in der Lage, schwierige Werke zu komponieren. Aus irgendeinem Grund geht ihre musikalische Begabung – wie im Falle von Lemke – anscheinend oft mit Blindheit und geistiger Behinderung einher. Eines der bekanntesten Beispiele war „Der blinde Tom“ Bethune, der von 1849 bis 1908 lebte. Zu seiner Zeit feierte man ihn als „das achte Weltwunder“. Obwohl er keine hundert Wörter sprechen konnte, spielte er ganz wunderbar mehr als 7000 Stücke auf dem Klavier, viele davon selbst komponiert. (Kürzlich nahm der Musiker John Davis einige von Bethunes Kompositionen auf und brachte sie als CD auf den Markt.)

Wenn Menschen mit Savant-Syndrom bildend künstlerisch veranlagt sind, drücken sie sich mit unterschiedlichen Mitteln aus, am häufigsten jedoch in Zeichnungen und Skulpturen. Eine verblüffende Leistung vollbringt Alonzo Clemons: Der Künstler kann zum Beispiel innerhalb von weniger als zwanzig Minuten die perfekte Replik eines Tieres erstellen, das er nur flüchtig auf dem Fernsehbildschirm gesehen hat. Jedes Detail seines Wachsmodells stimmt haargenau – jede Faser, jeder Muskel ebenso wie die Proportionen.

Die mathematisch begabten Savants können unglaublich schnell rechnen und haben oft ein besonderes Faible für Primzahlen. Erstaunlicherweise ist das so genannte Kalenderrechnen, wie Peek es beherrscht, nicht auf Menschen mit mathematischen Inselbegabungen beschränkt, sondern tritt anscheinend mit vielen unterschiedlichen Fähigkeiten gepaart auf.

Lernen ohne zu begreifen

Andere Leistungen sind seltener zu beobachten, etwa die Fähigkeit, viele fremdsprachige Wörter und Phrasen auswendig zu lernen, ohne sie jedoch zu verstehen. Dazu gehören auch herausragende Kenntnisse in Gebieten wie Geschichte, Neurophysiologie, Statistik oder Navigation. Eine verstärkte Sensibilität für Gerüche, taktile oder visuelle Reize kommt ebenfalls vor. Unter die eher seltenen Talente fallen auch besondere räumliche Fähigkeiten. Die musikalisch begabte, blinde Ellen kann beispielsweise in einem dichten Wald ihren Weg finden, ohne irgendwo dagegen zu laufen. Ihre Savant-Talente erstrecken sich auch auf ein perfektes Zeitgefühl. Entdeckt wurde es, als Ellens Mutter ihr eines Tages erlaubte, sich die „Dame von der Zeitansage“ im Telefon anzuhören. Anscheinend stellte Ellen ihre innere Uhr danach, als sie eine kurze Weile der automatischen Zeitansage gelauscht hatte. Seitdem kann sie jedenfalls ohne Uhr auf die Sekunde genau sagen, wie spät es gerade ist – zu jeder Jahreszeit.

Inselbegabungen hängen stets mit einem ungewöhnlichen Gedächtnis zusammen: eng fokussiert und tiefgehend, aber rein schematisch und praktisch ohne inhaltliches Verständnis für die Sache. Einige frühe Beobachter sprachen treffend von einem „Gedächtnis ohne Begreifen“. Down selbst benutzte den Ausdruck „verbale Adhäsion“. Einer seiner Patienten war ein Junge, der das sechsbändige Werk „Geschichte des Verfalls und Untergangs des Römischen Reiches“ des britischen Historikers Edward Gibbon gelesen hatte und Wort für Wort vortragen konnte, ohne auch nur etwas davon zu verstehen.

Obwohl Menschen mit Inselbegabungen viele Talente, etwa ein gutes Gedächtnis, gemeinsam haben, unterscheiden sie sich enorm im Grad der Ausprägung. Einige von ihnen konzentrieren

Literaturhinweise

Hochbegabte, Wunderkinder und „Savants“. Von Ellen Winner in: Intelligenz, Spektrum der Wissenschaft Spezial 3, S. 40, 1999.

Extraordinary People: Understanding Savant Syndrome. Von Darold A. Treffert. IUniverse.com, 2000.

Emergence of Artistic Talent in Frontotemporal Dementia. Von B. Miller, J. Cummings, F. Mishkin et al. in: Neurology, Bd. 51, Nr. 4, S. 978, 1. Oktober 1998.

Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“.*

sich auf triviale Dinge wie das Auswendiglernen von Sportstatistiken oder Autokennzeichen und erreichen dabei gewisse Erfolge. Talentiertere Personen haben musikalische oder künstlerische Fähigkeiten, die deutlich über dem liegen, was man von Menschen mit ihrer Behinderung erwarten würde. Nur wenige entwickeln jedoch so herausragende Eigenschaften, dass diese auch bei einem nicht behinderten Menschen auffielen. Heute dürften weniger als fünfzig Personen weltweit mit derartigen Inselbegabungen bekannt sein.

Welches besondere Talent auch immer einen Savant auszeichnet – meist begleitet es ihn sein ganzes Leben. Regelmäßiger Gebrauch unterstützt die Fähigkeit und kann sie manchmal sogar noch verbessern. Und in fast allen Fällen blieben die Begabungen trotz aller Befürchtungen erhalten, wenn die Person Sprache, soziales Verhalten und Alltagsfähigkeiten erwarb. Tatsächlich helfen die Begabungen den Menschen häufig, sich eine Art geregelten Tagesablauf oder ein normales Leben aufzubauen (Kasten Seite 50).

Wenn auch Experten inzwischen die Fähigkeiten von Menschen mit Inseltalenten besser charakterisieren können, gibt es dennoch keine umfassende Theorie, die beschreibt, wie und warum diese Personen tun, was sie tun. Den erfolgreichsten Modellen zufolge veranlasst eine Schädigung der linken Hirnhälfte die rechte Hälfte, den Verlust auszugleichen. Seit mehreren Jahrzehnten deuten Hinweise in diese Richtung. Bei einer 1975 durchgeführten pneumo-enzephalografischen Untersuchung an 17 autistischen Patienten wiesen allein 15 davon Schäden in der linken Hirnhälfte auf. (Dies war ein schmerzhaftes bildgebendes Verfahren, bei dem ein Arzt Luft als Röntgen-Kontrastmittel in die Flüssigkeit einbrachte, die das Gehirn umgibt und seine Hohlräume füllt. Die Technik wird mittlerweile nicht mehr angewandt.)

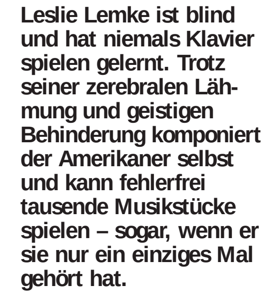
Weiteren Rückhalt erhielt die Theorie durch eine Studie von T.L. Brink aus dem Jahre 1980. Der Psychologe vom Crafton Hills College in Kalifornien beschrieb darin den dramatischen Fall eines neunjährigen Jungen, der nach einer Schussverletzung der linken Hirnhälfte stumm, taub und rechtsseitig gelähmt war. Nach dem Unglück entwickelte das Kind eine ungewöhnliche mechanische Inselbegabung: Er konnte Fahrräder mit Gangschaltungen reparieren und machte technische Erfindungen, wie einen Sandsack, der pendelte und wippte wie ein richtiger Box-Gegner.

Auch die Ergebnisse von Bernard Rimland vom Autism Research Institute in San Diego sprechen für einen Zusammenhang zwischen Veränderungen der linken Hirnhälfte und dem Savant-Syndrom. Rimland unterhält die größte Datenbank der Welt über autistische Menschen, mit mehr als 34 000 Patienten. Er stellte fest, dass die Inselbegabungen von Autisten meistens Funktionen der rechten Hirnhälfte betreffen, während ihre am schlechtesten entwickelten Fähigkeiten mit der linken Hirnhälfte in Verbindung stehen.

In den späten 1980er Jahren lieferten Norman Geschwind und Albert M. Galaburda eine denkbare Erklärung für einige Ursachen der linksseitigen Hirnschädigungen – und für die relative Häufigkeit von Inselbegabungen bei Männern. Die beiden Neurologen von der Harvard-Universität wiesen darauf hin, dass die linke Hirnhälfte ▶







Leslie Lemke ist blind und hat niemals Klavier spielen gelernt. Trotz seiner zerebralen Lähmung und geistigen Behinderung komponiert der Amerikaner selbst und kann fehlerfrei tausende Musikstücke spielen – sogar, wenn er sie nur ein einziges Mal gehört hat.

ihre Entwicklung normalerweise später abschließt als die rechte Hälfte. Damit unterliegt sie längere Zeit allen möglichen vorgeburtlichen Einflüssen, von denen manche schädlich sein können.

Im männlichen Fetus kann zirkulierendes Testosteron als einer dieser ungünstigen Faktoren wirken, indem es in der empfindlicheren linken Hirnhälfte das Wachstum verlangsamt und die neuronalen Funktionen beeinträchtigt. Infolgedessen kompensiert die rechte Hirnhälfte öfter den Ausfall bei Männern, wird größer und dominanter. Nicht nur beim Savant-Syndrom ist ein Ungleichgewicht zu Lasten des männlichen Geschlechts zu verzeichnen, sondern auch bei anderen zentralnervösen Fehlfunktionen wie Legasthenie, verzögertem Sprechen, Stottern, Hyperaktivität und Autismus.

Ausgleichende Gerechtigkeit?

Neuere Ergebnisse über viel spätere Schädigungen der linken Hirnhälfte weisen interessanterweise ebenfalls in diese Richtung. 1998 untersuchte Bruce L. Miller von der Universität von Kalifornien in San Francisco fünf ältere Patienten mit frontotemporaler Demenz (FTD), einer frühzeitigen Einbuße an geistigen Fähigkeiten, bedingt durch Störungen in Stirn- und Schläfenlappen des Gehirns (Kasten unten). Diese Patienten hatten parallel zum Auftreten und Fortschreiten ihrer Demenz künstlerisches Talent entwickelt. Sie waren in der Lage, akribisch genaue Kopien von Kunstwerken herzustellen und konnten wunderbar malen. Wie bei Personen mit dem Savant-Syndrom verfügten sie über eine visuelle, keine verbale Begabung. Messungen mit einem modernen bildgebenden Verfahren, das die Hirndurchblutung erfasst, ergaben vor allem linksseitige Schäden. Gleiches stellte Miller dann bei sieben weiteren Patienten fest, die nach dem Beginn der Erkrankung musikalische oder andere künstlerische Fähigkeiten entwickelt hatten.

Zusammen mit Kollegen verglichen er und Craig Hou von der Washington University die Bilder der Demenz-Patienten mit jenen eines neunjährigen, künstlerisch veranlagten Autisten mit dem Kürzel DB. Bei ihm war der Neocortex teilweise besser, der linke Schläfenlappen hingegen schlechter durchblutet. Die „Neuhirnrinde“ ist an höheren kognitiven Funktionen beteiligt, der Schläfenlappen hingegen hat mit gewissen Aspekten des Gedächtnisses und mit Emotionen zu tun. Miller hofft, weitere Personen mit künstlerischen Inselbegabungen überprüfen zu können. Denn der Umstand, dass ältere Patienten mit frontotemporaler Demenz, die neue Talente entwickelt haben, die gleichen pathologischen Befunde aufweisen wie der neunjährige DB, ist schon ziemlich bemerkenswert. Es ist gut möglich, dass Forscher demnächst in der Lage sein werden, die neurologischen Besonderheiten des Savant-Syndroms präzise zu benennen.

Schwieriger wird es wahrscheinlich, das scheinbar grenzenlose Gedächtnis von Savants physiologisch zu charakterisieren. Mortimer Mishkin vom National Institute of Mental Health in Bethesda (Maryland) hat hierfür eine Unterteilung der neuralen Schaltkreise vorgeschlagen. Danach wäre ein höherer Schaltkreis zwischen der Hirnrinde und dem tiefer gelegenen limbischen System zuständig für das so genannte semantische Gedächtnis, das als Wissens- oder Faktengedächtnis fungiert. Ein niederer Schaltkreis zwischen Hirnrinde und einem als Streifenkörper bezeichneten Hirnkern wäre für das – ursprünglichere – Gewohnheitsgedächtnis verantwortlich, das fachlich meist prozedurales Gedächtnis genannt wird. Wenn wir beispielsweise Fahrrad fahren, ohne über das Wie nachdenken ▶

Mit dem Savant-Syndrom leben



Fähre nach Tirée, gemalt 1978 von Richard Wawro

Ein paar vereinzelten Berichten zufolge verlieren Menschen mit Savant-Syndrom ihre besondere künstlerische Begabung, wenn man sie ermutigt, besser sprechen zu lernen. Der bekannteste dieser Fälle ist wahrscheinlich Nadia, ein autistisches Mädchen, das im Alter von drei Jahren erstaunliche Bilder zeichnete. Als sie sieben wurde, kam sie auf eine Schule für autistische Kinder, die vorwiegend die sprachlichen Fähigkeiten förderte. Im Teenageralter konnte Nadia tatsächlich besser sprechen, dafür war sie aber nicht mehr in der Lage, brillante und komplizierte Zeichnungen anzufertigen.

Dieses Entweder-oder zwischen Begabung auf der einen und Sprache oder Sozialisation auf der anderen Seite haben wir in unserer Arbeit nicht beobachtet. Stattdessen haben sich die außergewöhnlichen Fähigkeiten der Menschen mit Savant-Syndrom als eine Stärke erwiesen, auf die sie bauen und die sie als Ariadnefaden auf dem Weg zu einem normaleren Leben nutzen konnten. Das Talent hilft diesen Personen, ihre sozialen Fähigkeiten zu verbessern, ihr Sprachvermögen zu erweitern und unabhängiger zu werden. Es gibt ihnen ein Gefühl von Erfüllung, das ihnen wiederum erlaubt, mehr am Geschehen in der Welt teilzunehmen. Der musikalisch talentierte Leslie Lemke wurde lebhafter, begann Konzerte zu geben und mit dem Publikum zu interagieren. Der autistische Maler Richard Wawro fühlt sich inzwischen glücklich und aufgeregt, wenn er eine Arbeit abgeschlossen hat, und liebt Feierlichkeiten. Gedächtniskünstler Kim Peek hat die soziale Isolation durchbrochen, in der er sich vor dem Film *Rain Man* befand. Jetzt fährt er durchs Land und spricht mit Hunderten von Schulklassen.

Glücklicherweise ist der Ansatz, sowohl die Inselbegabungen als auch die Fähigkeiten für ein normales Leben zu fördern, inzwischen ein anerkanntes Verfahren.



Der Schotte Richard Wawro, ein international renommierter Maler, stellte erstmals mit 17 Jahren seine Werke aus. Wawro ist Autist.

zu müssen, dann ist diese Funktionseinheit im Spiel. Die Gedächtnisleistungen beim Savant-Syndrom scheinen von eben dieser Art zu sein.

Dieselben Faktoren, die Schäden in der linken Hirnhälfte verursachen, könnten auch die höheren Gedächtnis-Schaltkreise mitschädigen. Was hieße, dass Menschen mit Savant-Syndrom sich auf die ursprünglicheren, aber verschonten Schaltkreise des prozeduralen Gedächtnisses stützen müssten. Möglicherweise lassen Hirnschäden – gleich ob nun durch Hormone, Krankheiten, vorgeburtliche oder spätere Verletzungen bedingt – in einigen Fällen gewisse Fertigkeiten der rechten Hirnhälfte entstehen, die mit dem prozeduralen Gedächtnis zusammenhängen. Unter diesen Umständen könnte dann das Savant-Syndrom auftreten.

Das Geniale in uns anzapfen

Neu auftauchende Inselbegabungen bei dement gewordenen Personen werfen die grundlegende Frage auf, welche verborgenen Talente in jedem von uns schlummern. Entsprechend bemühen sich einige Forscher, das hervorzulocken, was sie den „kleinen Rain Man in jedem von uns“ nennen. Ein dabei eingesetztes experimentelles Verfahren ist die wiederholte transcraniale magnetische Stimulation. Es arbeitet mit starken lokalen Magnetpulsen, welche die Nerventätigkeit beeinflussen, sie teils lahm legen, teils fördern.

Tracy Morell von der University of South Australia, Robyn L. Young von der Flinders University in Adelaide und Michael C. Ridding von der Adelaide University beeinflussten mit solchen Magnetpulsen jene Region des linken Schläfenlappens, die bei FTD-Patienten geschädigt war. Nur zwei der 17 getesteten gesunden Freiwilligen entwickelten vorübergehend mehrere Talente, wie Kalenderrechnen, künstlerische Fähigkeiten und ein verbessertes prozedurales Gedächtnis. Andere entdeckten sporadisch einzelne neue Begabungen an sich, die ebenfalls nur wenige Stunden anhielt. Die Wissenschaftler nehmen deshalb an, dass Inselbegabungen in der normalen Bevölkerung wie bei behinderten Personen nur zu einem geringen Prozentsatz vorkommen.

Dennoch glauben viele Experten an die Möglichkeit, das Geniale der Inselbegabungen anzapfen zu können. Allan Snyder und John Mitchell vom Centre for the Mind in Canberra, Australien, sind der Ansicht, diese Gehirnprozesse liefen in allen Menschen ab, würden jedoch durch anspruchsvolleres, begreifendes Denken überlagert. Autistische Menschen mit Savant-Syndrom, so folgern sie, haben privilegierten Zugang zu niederen Informationsebenen, die normalerweise nicht durch Introspektion erreichbar sind.

Auch wir meinen, dass jeder Mensch über einige der Schaltkreise und Voraussetzungen verfügt, die für Inselbegabungen spezifisch sind. Allerdings sind sie weniger zugänglich – zum Teil, weil unsere Gesellschaft eher auf Fähigkeiten der linken Hirnhälfte ausgerichtet ist. Dennoch kann man mitunter Elemente der Savant-Eigenschaften in sich selbst finden: in jenen Momenten, wenn man gerade den unerwarteten Durchbruch bei einer Sache schafft oder eine neue Fähigkeit an sich entdeckt. Manche Prozeduren liefern Hinweise auf riesige Mengen schlummernder Erinnerungen in jedem von uns. Zu Tage treten sie teils bei Hypnose oder unter dem Einfluss eines Entspannung vermittelnden Barbiturats, teils bei Hirnstimulationen während einer neurochirurgischen Operation. Auch Träume haben die Macht, diese Erinnerungen zu wecken oder neue Fähigkeiten zu befördern.

Kein Modell von der Arbeitsweise des Gehirns ist vollständig, solange es nicht das seltene

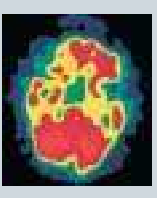
Neu auftauchende Talente



BEIDE ABBILDUNGEN: MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG VON BRUCE L. MILLER, U.C.S.F.

Wissenschaftler stießen in den letzten Jahren auf Patienten mit so genannter frontotemporaler Demenz (FTD), die wunderbar malen können, obwohl sie vor ihrer Erkrankung kein Talent dafür zeigten. Diese Personen haben also, während ihre allgemeinen geistigen Fähigkeiten abnahmen, eine Art Inselbegabung entwickelt.

Ein Beispiel bietet dieses Gemälde (links) einer 64-jährigen Patientin mit FTD. Bruce L. Miller von der Universität von Kalifornien in San Francisco hat bei vielen FTD-Patienten Schädigungen in der linken Hirnhälfte festgestellt. Einer Theorie zufolge entstehen Inselbegabungen, wenn die mehr künstlerisch veranlagte rechte Hälfte den Ausfall auf der linken Seite ausgleicht. In dem rechts gezeigten Spezialtomogramm eines FTD-Patienten verraten die roten Bereiche eine verstärkte Durchblutung der rechten vorderen Hirnhälfte.





Alonzo Clemons kann von jedem Tier perfekte Wachsskulpturen anfertigen – selbst wenn er es nur kurz im Fernsehen betrachtet hat. In den USA genießen seine Statuen, die eine Gallerie in Aspen (Colorado) verkauft, einen guten Ruf. Clemons ist geistig retardiert.

Savant-Syndrom erklären kann. Jetzt, da es Techniken gibt, die Struktur und Funktion des Gehirns auch ohne äußere Eingriffe zu untersuchen, können entsprechende Studien mit detaillierten neuropsychologischen Tests bei solchen Menschen kombiniert werden. Wir hoffen, dass der anekdotische Charakter der Fallstudien, wie er im vergangenen Jahrhundert typisch für die wissenschaftliche Literatur auf diesem Gebiet war, bald ersetzt wird durch Vergleiche zwischen verschiedenen Gruppen, behinderter wie nicht behinderter, mit unterschiedlich stark ausgeprägten Begabungen.

Das Savant-Syndrom bietet einzigartige Einblicke ins Gehirn, gerade was die strittige Frage anbelangt, ob es nur eine einzige allgemeine oder viele verschiedene Formen von Intelligenz gibt. Außerdem könnte es zum Verständnis der Mechanismen beitragen, die das Gehirn flexibel in seiner Entwicklung und Arbeit machen sowie Schäden kompensieren oder reparieren – alles Forschungsgebiete von immenser Bedeutung, um Erkrankungen wie Schlaganfall, Lähmungen und Alzheimer zu durchschauen und zu behandeln.

Doch die wissenschaftliche Seite des Savant-Syndroms ist nur das eine. Denn die Gesellschaft kann viel lernen von diesen bemerkenswerten Menschen und ihren ebenso bemerkenswerten Familien, Betreuern, Therapeuten und Lehrern. Eine der wichtigsten Erkenntnisse dürfte sein, dass ihre Persönlichkeit bei weitem nicht durch die neuralen Vorgaben festgelegt ist. Vielmehr entwickeln sich Savants dank der Unterstützung, Zuversichtlichkeit, Beharrlichkeit und Liebe jener Personen, die für sie sorgen. Am Savant-Syndrom erfahren wir wohl mehr über das menschliche Gehirn und die Menschlichkeit als jemals zuvor. ■





Darold A. Treffert *(links), Psychiater am St. Agnes-Hospital in Fond du Lac (Wisconsin), forscht seit 1962 über Autismus und das Savant-Syndrom. Damals lernte er erstmals einen Menschen mit einer solchen Inselbegabung kennen.* **Gregory L. Wallace** *ist Gastprofessor am Forschungszentrum des psychiatrischen Instituts in London. Zurzeit untersucht er, warum Menschen mit Autismus gehäuft Inselbegabungen entwickeln.*



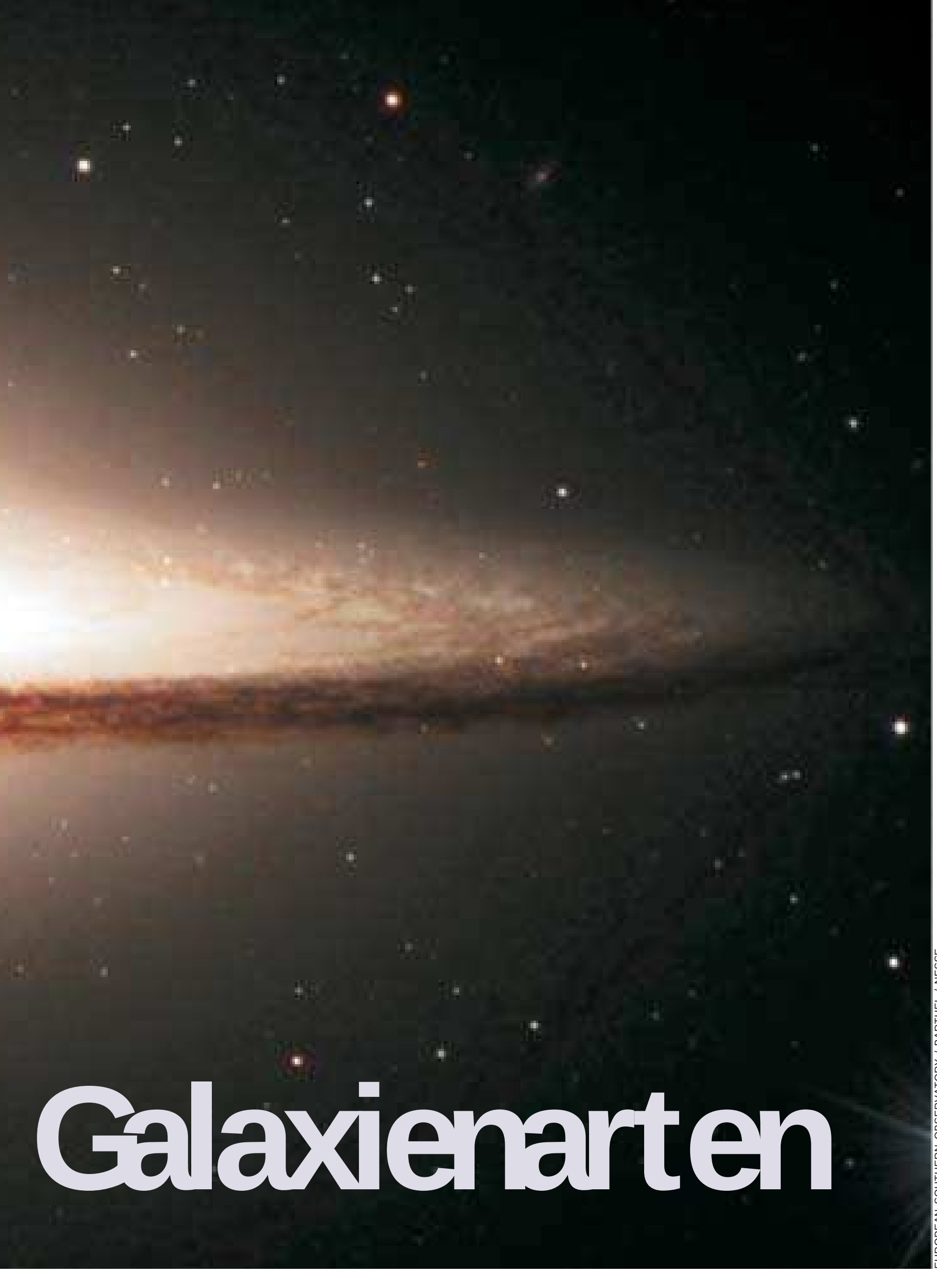
Über den Ursprung der

Neue Beobachtungstechniken und Computersimulationen erlauben den Astronomen, die Geburt von Sternsystemen in der Frühzeit des Universums zu rekonstruieren. Damit sind sie der Ursache für die verwirrende Vielfalt der Galaxienformen auf der Spur.

Von Guinevere Kauffmann und Frank van den Bosch

In Science-Fiction-Romanen scheitert ein riesiges Imperium häufig an seinem Größenwahn: Es will eine ganze Galaxie erobern und beherrschen – in der Tat ein hochtrabendes Unterfangen. Um unser Milchstraßensystem, die Galaxis, zu unterjochen, müsste ein Imperium hundert Milliarden Sterne bezwingen. Aber Kosmologen – Astronomen, die das Universum als Ganzes untersuchen – beeindruckt das wenig. Das Milchstraßensystem ist nur eine von mindestens fünfzig Milliarden Galaxien innerhalb des beobachtbaren Kosmos: Es zu erobern hieße nur, eine unbedeutende Sterneninsel zu unterwerfen.

Vor einem Jahrhundert wusste noch niemand, dass es all diese Galaxien überhaupt gibt. Für die meisten Astronomen



Galaxienarten

EUROPEAN SOUTHERN OBSERVATORY / BARTHEL / NESSE

erfüllte das Milchstraßensystem das gesamte Universum. Das All sollte in diesem Weltbild vielleicht eine Milliarde Sterne enthalten. Die wenigen diffusen „Nebel“, die mancherorts am Firmament zu sehen sind, hielten die Beobachter für Sterne, die entstehen oder vergehen. Dann aber begann in den ersten Jahrzehnten des 20. Jahrhunderts das goldene Zeitalter der Astronomie: Der Amerikaner Edwin Hubble und andere Astronomen fanden heraus, dass viele dieser Nebel eigenständige Welteninseln oder Galaxien sind (siehe „Edwin Hubble und die Expansion des Universums“, Spektrum der Wissenschaft 09/1993, S. 78)

Warum sammeln sich Sterne zu solch gigantischen Gebilden, die durch riesige leere Zonen getrennt sind, und wie kommen die Galaxien zu ihrer verwirrenden Vielfalt an Formen, Größen und Massen? Seit Jahrzehnten geht die Wissenschaft diesen Fragen nach. Einer Galaxie bei ihrem Entstehen zuschauen können die Forscher allerdings nicht: Der Vorgang dauert viel zu lange. Stattdessen müssen sie die Entwicklung rekonstruieren, indem sie viele verschiedene extragalaktische Sternsysteme mit unterschiedlichem Entwicklungsgrad beobachten. Erst vor etwa einem Jahrzehnt sind solche Messungen Routine geworden, und ein neues goldenes Zeitalter der Astronomie begann.

Grandiose Fortschritte in der Teleskop- und Detektortechnik ermöglichen den Astronomen heute, die Veränderungen von Galaxien über kosmische Zeitskalen hinweg zu erfassen. Aufnahmen des Hubble-Weltraumteleskops und des Very Large Telescope (VLT) in Chile zeigen selbst sehr lichtschwache Galaxien am Himmel. Andere Großgeräte wie die beiden Keck-Teleskope auf Hawaii haben umfangreiches Datenmaterial über solch ferne Galaxien zusammengetragen. Weil deren Licht mehrere Jahrmilliarden unterwegs war, sehen wir diese Sternsysteme in einem frühen Entwicklungsstadium, das in der unmittelbaren Nachbarschaft unseres Milchstraßensystems nicht mehr vertreten ist. Die Astronomen haben damit etwas in der Hand, wovon Evolutionsbiologen nur träumen können: eine Art Zeitmaschine, mit der sie in die Vorzeit zurückreisen und die Entwicklung ihrer Studienobjekte von den frühesten Formen an untersuchen können.

Die Aufgabe hat wahrhaft astronomische Dimensionen. Physik auf extrem unterschiedlichen Skalen spielt eine Rolle, von der kosmologischen Entwicklung des gesamten Universums bis herab zur Bildung eines einzelnen Sterns. Das macht es schwer, wirklichkeitsgetreue Modelle der Galaxienbildung zu entwerfen, doch nur so kann sich der Kreis schließen. Nach der Entdeckung der Abermilliarden von extragalaktischen Sternsystemen schien es zunächst so, als hätten Stellarastronomie und Kosmologie nichts miteinander zu tun. Wie sollten auch die kleinen Sterne das Gesamtbild des Kosmos beeinflussen? Umgekehrt waren den Stellarastronomen die Debatten über den Ursprung des Universums viel zu abstrakt. Doch inzwischen wissen wir, dass ein geschlossenes Bild des Universums die großen und die kleinen Dinge gleichermaßen berücksichtigen muss.

Um zu verstehen, wie sich Galaxien bilden, suchen die Astronomen nach Mustern und Trends in ihren Eigenschaften. Gemäß dem bereits von Hubble eingeführten Klassifikationsschema kann man Galaxien grob in drei Klassen einteilen: elliptische, spiralförmige und irreguläre (Kasten Seite 57). Die massereichsten sind die elliptischen. Sie sind glatte, strukturarme und ungefähr kugelförmige Systeme mit wenig oder gar keinem Gas und Staub. In ihnen sausen die Sterne herum wie Bienen um einen Stock. Die meisten dieser Sterne sind sehr alt.

Spiralgalaxien wie unser Milchstraßensystem sind stark abgeplattete und strukturierte Gebilde, in denen sich die Sterne und das Gas auf mehr oder weniger kreisförmigen Bahnen um das Zentrum bewegen – deshalb werden sie auch Scheibengalaxien genannt. Die einem Feuerrad ähnelnden Spiralarme bestehen aus heißen jungen Sternen, Gas und Staub. Die Zentralgebiete der Spiralgalaxien sind verdickt. Diese „Bäuche“, die auch in der deutschen Fachsprache mit dem englischen Wort *bulges* bezeichnet werden, sind kugelförmige Anhäufungen von Sternen, die an kleine elliptische Ga- ▶

laxien erinnern. Ungefähr bei jeder dritten Spiralgalaxie setzen die Spiralarme nicht direkt am Bulge, sondern an einer länglichen Struktur an. Diese so genannten Balken entstehen wohl durch Instabilitäten in der Scheibe.

Die irregulären Galaxien passen in keine der beiden vorgenannten Klassen. Manche von ihnen könnten spiralförmige oder elliptische Sternsysteme gewesen sein, bevor sie durch Begegnungen mit einem Nachbarn vor relativ kurzer Zeit gestört wurden. Andere aber stehen einzeln im Raum und haben eine völlig unregelmäßige Gestalt, ohne jedes Anzeichen einer kürzlich erfolgten Störung.

In jeder dieser Klassen umspannt die Leuchtkraft der Galaxien einen weiten Bereich. Im Mittel jedoch sind elliptische Galaxien heller als Spiralen, und bei lichtschwächeren Sternsystemen ist der irreguläre Typ häufiger. Für die lichtschwächsten Galaxien bricht das Klassifikationsschema allerdings völlig zusammen. Solche Zwerggalaxien sind sehr uneinheitlich, und alle Versuche, sie in ein Ordnungsschema zu pressen, blieben umstritten. Grob gesprochen fallen sie in zwei Kategorien: gasreiche Systeme, in denen aktiv Sterne gebildet werden, und gasarme Systeme ohne Sternbildung.

Einen wichtigen Hinweis auf den Ursprung der Formenvielfalt lieferte eine bemerkenswerte Korrelation zwischen dem Typ und der lokalen Dichte der Sternsysteme. Die meisten Galaxien sind im Raum verstreut und haben keine direkten Nachbarn: Die meisten von ihnen sind Spiralsysteme; der Anteil der elliptischen liegt nur zwischen zehn und zwanzig Prozent. In Galaxienhaufen jedoch kehrt sich das Verhältnis um: Hier dominieren die elliptischen Systeme, und die wenigen Spiralen sind recht unscheinbar, mit nur wenig Gas und wenigen jungen Sternen. Diese so genannte Morphologie-Dichte-Beziehung hat die Astronomen lange vor ein Rätsel gestellt.

Ein kleiner Prozentsatz der spiralförmigen und elliptischen Systeme zeichnet sich durch eine Besonderheit aus: Sie enthalten einen extrem leuchtkräftigen, punktartigen Kern. Die extremsten und zugleich seltensten Vertreter solcher „aktiver Galaxienkerne“ (*active galactic nuclei*, AGN) sind die Quasare, wo die Zentren so gleißend hell leuchten, dass sie die jeweilige Wirtsgalaxie fast völlig überstrahlen. Die meisten Astronomen sind überzeugt, dass aktive Galaxienkerne von Schwarzen Löchern mit Millionen bis Milliarden Sonnenmassen angetrieben werden. Der Theorie zufolge wandelt sich etwa ein Zehntel der Gasmasse, die in solche Monster stürzt, in Strahlungsenergie um. Derart gewaltige Leuchtfeuer kann man quer durch das gesamte Universum sehen.

Einst für Abnormitäten gehalten, haben sich die aktiven Galaxienkerne jüngst als wesentlich für den Prozess der Galaxienbildung herausgestellt. Ihre Anzahl war am höchsten, als das Universum ungefähr ein Viertel seines heutigen Alters hatte – also etwa drei bis vier Milliarden Jahre nach dem Urknall (siehe „Quasare – die kosmischen Mahlströme“, Spektrum der Wissenschaft 08/1998, S. 40). In dieser Ära entstanden auch die meisten Sterne in den elliptischen Galaxien. Auch glaubt man heute, dass in praktisch jedem elliptischen Sternsystem ein extrem massereiches Schwarzes Loch verborgen ist, ebenso in jeder Spiralgalaxie mit einem Bulge – unabhängig davon, ob deren Kerne heute noch aktiv sind oder nicht. Folglich sollte jede Galaxie im Zuge ihrer Entwicklung eine oder mehrere Phasen der AGN-Aktivität durchlaufen. Solange Materie in das Schwarze Loch fällt, ist der Kern aktiv. Strömt kein neues Material mehr nach, fällt er in eine Art Winterschlaf.

Fast alles, was wir über jene Phänomene wissen, haben wir aus elektromagnetischer Strahlung, aus Photonen erschlossen: dem optischen Sternenlicht, den Radiowellen von neutralem Wasserstoffgas, der Röntgenstrahlung von ionisiertem Gas. Doch der größte Teil der Materie im Kosmos strahlt gar keine Photonen ab: Das ist die berühmte Dunkle Materie, deren Vorhandensein sich lediglich über ihre Schwerkraftwirkung erschließt. Die sichtbaren Teile der Galaxien sind nach heutiger Vorstellung von gigantischen „Halos“ aus Dunkler Materie umgeben. Auf noch größeren Skalen halten wohl ähnliche Halos ganze Galaxienhaufen zusammen.

Gewöhnliche und Dunkle Materie gingen getrennte Wege

Leider hat bis jetzt noch niemand die Dunkle Materie direkt nachgewiesen. Woraus sie besteht, ist nach wie vor ungeklärt. Heute favorisieren die meisten Astronomen die Vorstellung, die Dunkle Materie bestehe größtenteils aus noch nicht identifizierten Elementarteilchen, die kaum mit anderen Teilchen oder auch untereinander in Wechselwirkung treten. Diese Klasse von Teilchen wird meist Kalte Dunkle Materie (*cold dark matter*, CDM) genannt, und jedes kosmologische Modell, das ihre Existenz voraussetzt, ist ein CDM-Modell.

In den letzten zwei Jahrzehnten haben die Astronomen in mühevoller Arbeit ein Modell der Galaxienbildung entwickelt, das die Kalte Dunkle Materie mit einschließt. Es basiert auf der Standardtheorie vom Urknall, welche die Expansion des Universums beschreibt. Zwar sind sich die Astronomen noch nicht einig darüber, was genau die Expansion antrieb und was in den Momenten nach dem Urknall geschah, aber das ist für die Entstehung von Galaxien auch nicht wesentlich. Es reicht, wenn wir 100 000 Jahre nach dem Urknall in die Geschichte einsteigen, als das Universum Baryonen enthielt (die Bestandteile gewöhnlicher Atomkerne) sowie Elektronen (an die Kerne gebunden), Neutrinos, Photonen und Kalte Dunkle Materie. Beobachtungen zeigen, dass Materie und Strahlung damals sehr gleichmäßig verteilt waren: Die Dichte variierte von Ort zu Ort um nicht mehr als ein tausendstel Prozent. Die Herausforderung ist nun nachzuvollziehen, wie diese einfachen Zutaten zu der erstaunlichen Vielfalt der Galaxien führten.

Wenn man die Bedingungen damals mit denen heute vergleicht, fallen zwei wichtige Unterschiede auf. Zum einen überspannt das jetzige Universum einen enormen Bereich an Dichtewerten. So sind die Zentralbereiche von Galaxien mehr als hundertmilliardenmal dichter ►

IN KÜRZE

➤ Eines der lebendigsten Arbeitsgebiete der heutigen Astrophysik geht der Frage nach, wie der Formenreichtum der Galaxien entstanden ist. Teleskope spüren den allerersten Galaxien nach, und Computersimulationen verfolgen ihre Entwicklung im Detail.

➤ Die Forschung könnte für die Galaxien bald das erreichen, was sie für Sterne Anfang des 20. Jahrhunderts leistete: eine vereinheitlichte Erklärung, die auf wenigen grundlegenden Prozessen beruht, aber für eine Vielfalt von Himmelskörpern gilt. Bei Galaxien umfassen diese Prozesse Gravitations-Instabilitäten, Abkühlung durch Strahlung, Relaxation (wobei Galaxien ein inneres Gleichgewicht erreichen) und Wechselwirkungen zwischen Galaxien.

➤ Die noch offenen Fragen lassen sich möglicherweise klären, wenn der Einfluss der Sternentwicklung auf die Gestalt einer Galaxie genauer untersucht wird.

Klassifizierung der Galaxientypen

Verrät die Gestalt etwas über die Entwicklung?

Astronomen klassifizieren Galaxien nach einem Schema, das der Amerikaner Edwin Hubble in ursprünglicher Form als „Stimmgabeldiagramm“ bereits in den 1920er Jahren eingeführt hat. Demnach gibt es drei grundlegende Typen: elliptische (der Griff der Stimmgabel), spiralförmige (die beiden Zinken) sowie irreguläre (außerhalb der Stimmgabel, links). Die kleinsten Sternsysteme, die Zwerggalaxien (unten links), haben ihre eigene, allerdings unsichere Klassifikation.

Innerhalb jeder Typengruppe gibt es Untertypen, die mit Details der Galaxiengestalt zusammenhängen. Geht man die Stimmgabel von oben nach unten durch, so wird die galaktische Scheibe immer prägnanter und der Bulge immer unscheinbarer – jedenfalls auf optischen Aufnahmen. Die verschiedenen Typen könnten unterschiedliche Stadien der Entwicklung darstellen, wenn auch nicht in der durch das Stimmgabeldiagramm suggerierten Abfolge. Das Klassifizierungsschema ist also nicht als Stammbaum der Galaxienentwicklung anzusehen. Galaxien beginnen vielmehr als Spiralen ohne Bulges, erscheinen nach Kollisionen irregulär und enden als elliptische Galaxien oder Spiralen mit Bulges.

ELLIPTISCHE GALAXIEN

M89
E0

M49
E4

M110
E5

M84
S0

BALKENSPIRALEN

NGC660
SBa

NGC7479
SBb

M58
SBc

NORMALE SPIRALEN

NGC7217
Sa

NGC4622
Sb

M51
Sc

IRREGULÄRE

M82
irregulär

ZWERGGALAXIEN

M32
elliptisch

VII Zw 403
blauer kompakter Zwerg

Kleine Magellansche Wolke
irregulär

Leo I
sphäroidisch

M82: N. A. SHARP / NOAO / AURA / NSF; M32: B.KEEL / HALL TELESCOPE / LOWELL OBSERVATORY; VIIZW403: R. SCHULTE-LADBECK / U. HOPP / M. CRONE / ASTROOPHYSICAL JOURNAL; KLEINE MAGELLANSCHE WOLKE: NOAO / AURA / NSF; LEO I: DAVID MALIN / ANGLO-AMERICAN OBSERVATORY; M89, M49, M110, M84: NOAO / AURA / NSF; NGC 660: R. BRANCH / R. MILNER / A. BLOCK / NOAO / AURA / NSF; NGC 7479: A. BLOCK / NOAO / AURA / NSF; M58: F. CIESLAK / A. BLOCK / NOAO / AURA / NSF; NGC 7217: B. KEEL / R. BUTA / G. PURCELL / CERRO TOLOLO INTER- AMERICAN OBSERVATORY, CHILE; NGC 4622: G. BYRD / R. BUTA / T. FREEMAN / NASA; M51: NASA / STSCI / AURA

als das Universum im Mittel. Die Erde ist weitere zehn Milliarden Milliarden mal dichter. Zudem sind die Baryonen und die Kalte Dunkle Materie heute überhaupt nicht mehr so durchmischt wie einst: Die Baryonen bilden jetzt dichte Knoten (nämlich die Galaxien) innerhalb gigantischer Halos aus Dunkler Materie. Auf irgendeine Weise haben sich die Baryonen von der Kalten Dunklen Materie abgekoppelt.

Den ersten dieser Unterschiede erklärt die Gravitationsinstabilität: Wenn die Dichte in einer Raumregion geringfügig größer ist als im Mittel, übt der Massenüberschuss auch eine etwas überdurchschnittliche Schwerkraft aus und zieht weitere Materie an. Das Gravitationsfeld wird stärker, wodurch noch mehr Materie angezogen wird. Dieser sich selbst verstärkende Prozess vergrößert die ursprünglichen Dichteunterschiede. Die ganze Zeit über konkurriert die Schwerkraft in dieser Region mit der Expansion des Universums, welche die Materie auseinander zieht. Anfangs überwiegt die kosmische Expansion und die Dichte sinkt. Doch sie sinkt langsamer als in der Umgebung. Deshalb wird die relative Überdichte irgendwann so groß, dass die Schwerkraft über die Expansion siegt: Die Materie in der Region zieht sich enger zusammen, sie beginnt zu kollabieren.

Bis hierhin ist die Materieansammlung noch kein eigenständiges Gebilde, sondern lediglich ein Bereich zufällig erhöhter Dichte in dem Materieschleier, der das Universum erfüllt. Hat der Kollaps aber erst einmal eingesetzt, beginnt im Inneren dieses Keimes eine Art Eigenleben. In dem System – das wir jetzt eine Protogalaxie nennen können – stellt sich langsam ein Gleichgewicht ein. Wissenschaftler bezeichnen diesen Vorgang als Relaxation. Die Baryonen verhalten sich dabei wie die Teilchen eines Gases: Aufgeheizt durch Stoßwellen, die der Kollaps ausgelöst hat, tauschen sie durch direkte Stöße Energie aus und erreichen so ein hydrostatisches Gleichgewicht, bei dem sich Druck und Schwerkraft die Waage halten.

Innerhalb der Dunklen Materie verläuft die Relaxation jedoch völlig anders.

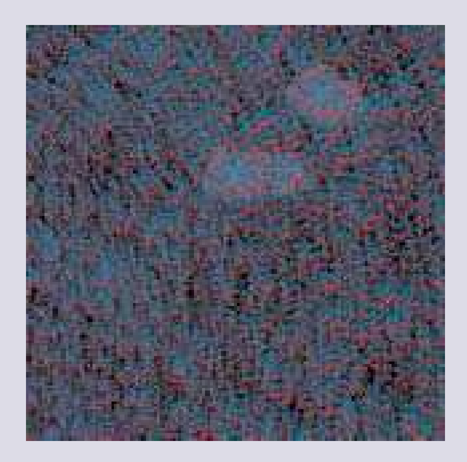
Bauanleitung für eine Galaxie

Dunkle Materie als Schlüsselbaustein

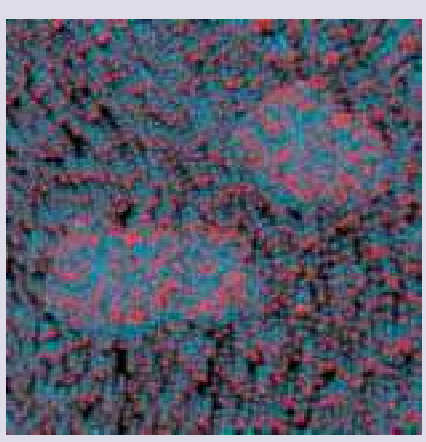
Drei grundlegende Mechanismen haben bewirkt, dass aus der Ursuppe des Universums schließlich Galaxien entstehen konnten:

- ➤ die durch den Urknall ausgelöste allgemeine Expansion des Kosmos,
- ➤ die Schwerkraft sowie
- ➤ die Eigenbewegung von Teilchen und größeren Gebilden.

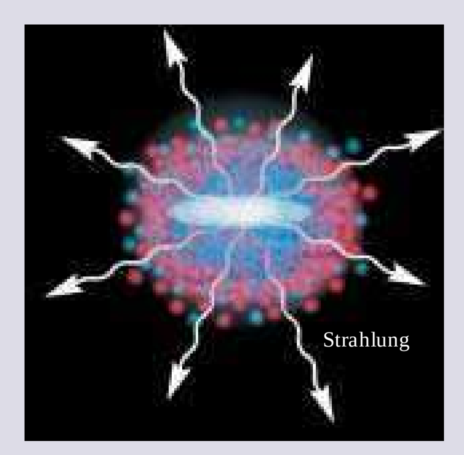
Das Zusammenspiel dieser Prozesse kann erklären, warum sich Galaxien zu den eigenständigen Sternsystemen entwickelten, wie wir sie milliardenfach im Universum sehen, und nicht zu einem diffusen Gasschleier oder zu Schwärmen Schwarzer Löcher. Modernen Theorien zufolge kondensierten zunächst kleine Objekte aus der Ursuppe, die sich dann zu größeren zusammenfanden. Als entscheidend erwies sich dabei die Dunkle Materie, die einem anderen Gleichgewichtszustand zustrebt als die gewöhnliche Materie.



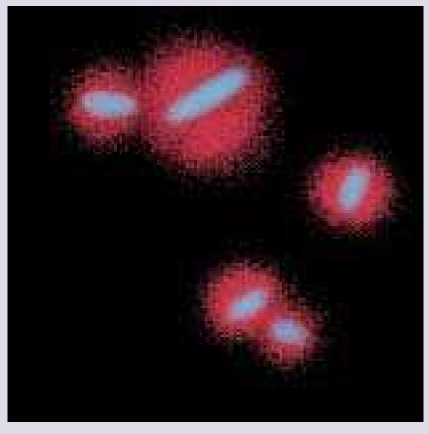
1 Am Anfang erfüllt ein Urgas – ein Gemenge aus gewöhnlicher (blau) und Dunkler Materie (rot) – das Universum. Seine Dichte variiert nur wenig von Ort zu Ort.



2 Zunächst dominiert die kosmische Expansion über die Schwerkraft. Das Gas wird im sich aufblähenden Raum verdünnt, aber Regionen höherer Anfangsdichte verdünnen sich langsamer.



5 Dunkle Materie, die nicht strahlen kann, behält diese Form. Aber die gewöhnliche Materie emittiert Strahlung und kollabiert zu einer rotierenden Scheibe, in der Sterne auskondensieren.



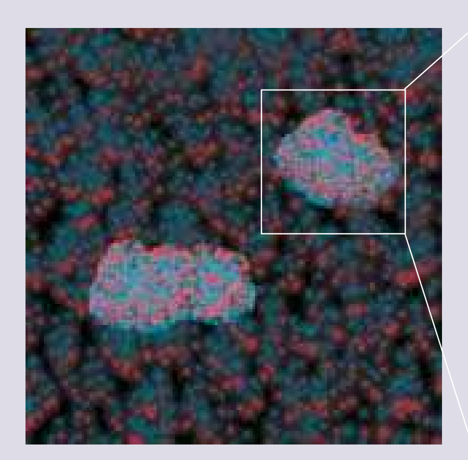
6 Benachbarte Protogalaxien üben Drehmomente aufeinander aus und verschmelzen nach und nach zu immer größeren Gebilden. (Dieser Vorgang überlappt sich mit den Stufen 4 und 5.)

Weil deren Teilchen kaum miteinander wechselwirken, können sie keine Energie durch Stöße übertragen. Ein System aus Kalter Dunkler Materie kann demzufolge kein hydrostatisches Gleichgewicht erreichen. Stattdessen spielt sich etwas ab, was wir als heftige Relaxation bezeichnen können: Jedes einzelne Teilchen tauscht Energie nicht mit seinesgleichen, sondern über das Schwerefeld mit dem gesamten Kollektiv aus.

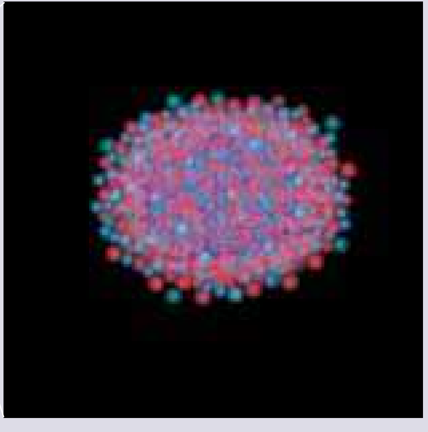
Eine solche Umwandlung zwischen Gravitations- und Bewegungsenergie findet stets statt, wenn sich ein Körper in einem Schwerefeld bewegt. Wenn man einen Ball in die Luft wirft, steigt er höher, wird aber langsamer: Die Gravitationsenergie vergrößert sich auf Kosten der kinetischen. Beim Fallen geschieht das Umgekehrte: Der Ball gewinnt kinetische Energie in dem Maße, in dem die Gravitationsenergie abnimmt. Mit den Teilchen der Kalten Dunklen Materie in einer Protogalaxie geschieht dasselbe. Sie bewegen sich und verändern dabei je nach Balance zwischen Gravitations- und kinetischer Energie ihre Geschwindigkeit. Doch anders als Bälle nahe der Erdoberfläche bewegen sich CDM-Teilchen durch ein zeitlich variierendes Schwerefeld. Schließlich wird dieses ja von all den Teilchen zusammen erzeugt, die an dem Kollaps beteiligt sind.

Veränderungen im Gravitationsfeld lassen nun einige Teilchen Energie gewinnen und andere verlieren. Wie bei den Baryonen, so erlaubt die Umverteilung der Teilchenenergien eine Relaxation des gesamten Systems. Dieser Vorgang, durch den der Halo ein Gleichgewicht erreicht, ist kompliziert und konnte noch nie im Detail durchgerechnet werden. Stattdessen begnügen sich die Forscher mit numerischen Simulationen: Deren Ergebnisse zeigen, dass alle CDM-Halos, die in dieser Form von Gleichgewicht sind, ähnliche Dichteprofile aufweisen.

Am Ende des Kollapses und der Relaxation steht eine Protogalaxie, in derem Halo aus Dunkler Materie baryonisches Gas eingebettet ist, das sich in einem hydrostatischen Gleichgewicht befindet und üblicherweise einige Millionen Grad heiß ist. Während jedes CDM-Teilchen von nun an seine Energie behält, kann das baryonische Gas strahlen. Durch diesen Energieverlust kühlt es sich ab, zieht sich zusammen und sammelt sich im Zentrum des Dunkelmaterie-Halos. Durch diese Abkühlung entkoppeln sich also die Baryonen von der Kalten Dunklen Materie.



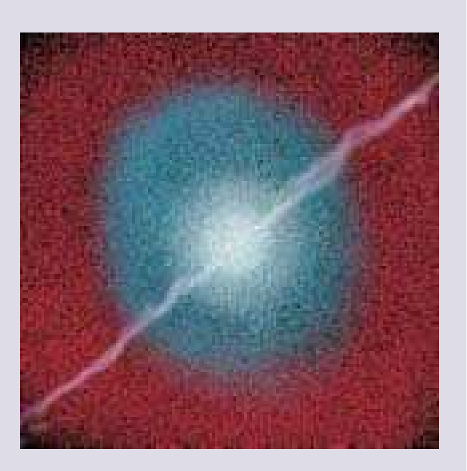
3 Die kompakteren Regionen werden irgendwann relativ zu ihrer Umgebung so dicht, dass die Schwerkraft die Oberhand über die kosmische Expansion gewinnt: Sie beginnen zu kollabieren.



4 Jede kollabierende Region erreicht schließlich einen Gleichgewichtszustand: Die Dichte der gewöhnlichen wie auch diejenige der Dunklen Materie ist im Zentrum am höchsten.



7 Verschmelzen zwei Scheiben ähnlicher Größe, vermischen sich die Bahnen der Sterne: Eine elliptische Galaxie entsteht. Später kann sich um diese eine Scheibe herausbilden.



8 Die Verschmelzung löst neue Sternbildung aus und lässt Materie in das zentrale Schwarze Loch strömen. So entsteht ein aktiver galaktischer Kern, der Jets aus heißer Materie ausstoßen kann.

DON DIXON

Galaxien stießen zusammen

Bislang haben wir die Vorgänge in einer einzelnen Protogalaxie beschrieben und ihre Umgebung ignoriert. In Wirklichkeit werden sich aber nahebei andere Protogalaxien bilden. Infolge der gegenseitigen Massenanziehung werden sie sich einander annähern, bis sie schließlich zu einem größeren Gebilde verschmelzen. Dieses wird wiederum mit anderen verschmelzen und so weiter. Ein solcher hierarchischer Aufbau ist ein Charakteristikum von CDM-Modellen.

Der Grund ist einfach: Weil kleinräumige Dichtefluktuationen großräumigen überlagert sind, erreicht die Dichte ihren Maximalwert in den kleinsten Bereichen (siehe Kasten Seite 62). Ein Analogon wäre der Gipfel eines Berges. Dessen höchste Stelle ist durch einen winzigen Gegenstand festgelegt – zum Beispiel durch einen Kiesel auf einem Felsbrocken auf einem Hügel auf dem Gipfel. Wenn sich eine Wolkenbank auf den Berg senkt, verschwindet der Kiesel zuerst, dann der Felsbrocken, der Hügel und schließlich der ganze Berg.

Im frühen Universum sind auf ähnliche Weise die kleinsten Protogalaxien die dichtesten Regionen. Sie sind also die ersten Bereiche, die kollabieren, gefolgt von immer größeren Strukturen. Was die Kalte Dunkle Materie von anderen denkbaren Arten von Dunkler Materie unterscheidet, sind ihre Dichtefluktuationen auf allen Größenskalen. Neutrinos zum Beispiel haben keine Fluktua-

tionen auf kleinen Skalen. Ein neutrinodominiertes Universum wäre wie ein Berg mit einem völlig glatten Gipfel.

Die hierarchische Entstehung der Dunkelmaterie-Halos lässt sich nicht durch einfache mathematische Beziehungen beschreiben; sie wird am besten im Computer simuliert. Um einen repräsentativen Teil des Universums mit genügend hoher Auflösung zu erfassen, damit die Entstehung einzelner Halos sichtbar wird, müssen die Wissenschaftler die modernsten Supercomputer einsetzen. Die statistischen Eigenschaften und die räumliche Verteilung der Halos, die bei diesen Simulationen entstehen, stimmen mit den tatsächlichen Beobachtungen exzellent überein. Diese Resultate stützen das hierarchische Bild und sind damit auch ein wichtiges Argument für das Vorhandensein von Kalter Dunkler Materie.

Das hierarchische Bild erklärt die Formen der Galaxien auf natürliche Weise. In Spiralgalaxien bewegen sich Sterne und Gas auf Kreisbahnen. Die Gestalt dieser Galaxien wird deshalb vom Drehimpuls bestimmt. Aber wo kommt dieser her? Im Standardbild übten die Protogalaxien Gezeitenkräfte aufeinander aus und versetzten sich gegenseitig in Rotation. Nachdem sie kollabiert waren, blieb bei jeder etwas Drehimpuls übrig.

Als sich das Gas in den Protogalaxien abzukühlen begann, zog es sich zusammen und sammelte sich nach und nach im Zentrum. So, wie sich Eiskunstläufer schneller drehen, wenn sie bei einer Pirouette die Arme anziehen, rotierte das Gas immer rascher, je weiter der Kollaps voranschritt. Das Gas plattete sich dabei ab, so wie auch die Erde infolge ihrer Drehung ein wenig abgeplattet ist. Schließlich rotierte das Gas so schnell, dass die nach außen gerichtete Zentrifugalkraft den nach innen wirkenden Zug der Gravitation gerade ausglich. Bei Erreichen dieses Gleichgewichtszustandes hatte das Gas bereits die Form einer Scheibe angenommen. Diese war ausreichend dicht, sodass sich das Gas zu kleineren Wolken verklumpen konnte,

Auf dem Weg zum inneren Gleichgewicht

Was eine Galaxie von einem beliebigen Teil des Raumes unterscheidet, ist ein innerer Gleichgewichtszustand. Dieses Gleichgewicht bestimmt die grundlegenden Eigenschaften der Galaxie wie ihre Gestalt und das Dichteprofil. (Ein vergleichbares Gleichgewicht bestimmt Größe und Temperatur von Sternen.) Die gewöhnliche und die Dunkle Materie erreichen ihr jeweiliges Gleichgewicht auf unterschiedlichen Wegen.



1 Die gewöhnliche Materie, überwiegend Wasserstoffgas, bewegt sich zunächst in beliebige Richtungen. Ihre Dichte variiert zufällig.



2 Die Gasteilchen stoßen aneinander, tauschen dabei Energie aus und erzeugen einen Druck, welcher der Schwerkraft entgegenwirkt.



3 Schließlich nimmt das Gas ein hydrostatisches Gleichgewicht ein, mit der höchsten Dichte nahe dem Schwerezentrum.



1 Anfangs ist die Dunkle Materie ebenso angeordnet wie die gewöhnliche. Der Unterschied ist, dass ihre Teilchen nicht zusammenstoßen.



2 Während sich die Teilchen herumbewegen, verändert sich das Schwerefeld, und die Teilchen gewinnen oder verlieren dadurch Energie.



3 Im Lauf der Zeit nimmt das System einen Gleichgewichtszustand ein. Das Schwerefeld fluktuiert dann nicht mehr.

DON DIXON

aus denen schließlich Sterne entstanden: Eine Spiralgalaxie war geboren.

Weil jeder Dunkelmaterie-Halo etwas Drehimpuls mitbekam, muss man sich wundern, warum nicht alle Galaxien Spiralen sind. Wie entstanden die elliptischen Galaxien? Lange diskutierten die Astronomen zwei konträre Ansichten. Gemäß der einen Vorstellung entstanden die meisten Sterne in den heutigen elliptischen Galaxien und in den Bulges, als früh in der kosmischen Geschichte das Gas überall im Universum kollabierte. In der anderen Sichtweise sind die elliptischen Sternsysteme gewissermaßen Spätgeborene, die durch die Verschmelzung von Spiralgalaxien entstanden.

Diese zweite Hypothese ist immer populärer geworden. Detaillierte Computersimulationen der Verschmelzung zweier Spiralgalaxien zeigen, wie das stark fluktuierende Gravitationsfeld die beiden Scheiben zerstört. Beide Systeme durchdringen sich dabei, ohne dass ihre Sterne direkt zusammenstoßen. Die Verschmelzung läuft deshalb ähnlich ab wie die eingangs beschriebene „heftige Relaxation" der Dunklen Materie: Energie wird zwischen den Gesamtsystemen ausgetauscht. Falls beide Galaxien vergleichbare Massen hatten, entsteht als Resultat ein einfaches Konglomerat von Sternen, dessen Eigenschaften stark an eine elliptische Galaxie erinnern. Das meiste Gas aus den zwei ursprünglichen Scheiben verliert seinen Drehimpuls und fällt Richtung Zentrum. Dort erreicht es hohe Dichten, wodurch sich mit einer gewaltigen Rate Sterne zu bilden beginnen. Später mag neues Gas einfallen, sich abkühlen und eine neue Scheibe um die elliptische Galaxie ausbilden. Das Resultat wäre dann eine Spiralgalaxie mit einem Bulge in der Mitte.

Die hohe Effizienz der Sternbildung während Verschmelzungen erklärt, weshalb elliptische Galaxien meist wenig Gas enthalten: Sie haben es schlicht verbraucht. Das Verschmelzungsszenario ist auch mit der Morphologie-Dichte-Beziehung verträglich: Eine Galaxie in dichter Umgebung erleidet mehr Kollisionen und wird mit höherer Wahrscheinlichkeit zu einer elliptischen.

Beobachtungen bestätigen, dass Verschmelzungen und Wechselwirkungen im Universum häufig vorkamen, vor allem in der Anfangszeit. Auf Bildern des Hubble-Weltraumteleskops ist zu erkennen, dass die Gestalt vieler ferner (und deshalb junger) Galaxien gestört ist – ein deutliches Indiz für Wechselwirkungen. Auch nimmt der Anteil der so genannten Starburst-Galaxien, in denen neue Sterne mit enormer Rate gebildet werden, dramatisch zu, je weiter die Beobachtungen in die Vergangenheit reichen. Möglicherweise können die Astronomen hier erstmals die Entstehung elliptischer Galaxien direkt beobachten.



Wenn elliptische Galaxien und die Bulges von Spiralgalaxien mit galaktischen Verschmelzungen zusammenhängen, dann müssen bei diesen Ereignissen auch extrem massereiche Schwarze Löcher entstehen. Deren Massen korrelieren stark mit denjenigen der elliptischen Galaxien oder Bulges, in denen sie sitzen, aber nicht mit den Massen der Spiralscheiben. Die Astronomen haben ihre Verschmelzungsmodelle inzwischen erweitert, um die extrem massereichen Schwarzen Löcher und somit auch die aktiven galaktischen Kerne miteinzubeziehen. Das reichlich vorhandene Gas, das während einer Verschmelzung Richtung Zentrum geschleudert wird, könnte ein nicht aktives Schwarzes Loch wiederbeleben. Mit anderen Worten: Quasare waren deshalb in der Frühzeit des Universums häufiger, weil damals viel mehr Galaxien miteinander verschmolzen.

Zwerge passen nicht ins Bild

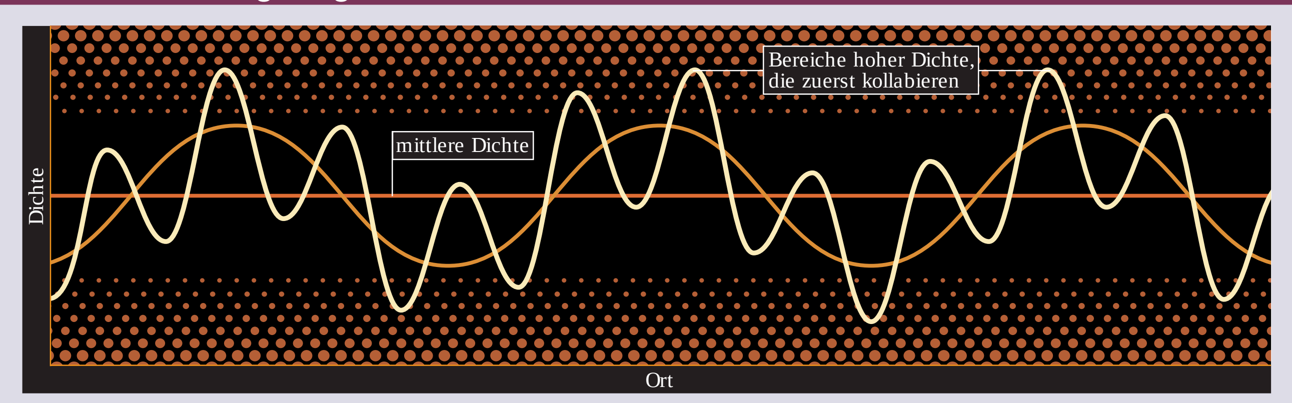
Was die Zwerggalaxien betrifft, so sind sie im hierarchischen Bild die Überbleibsel des Geschehens: kleine Zusammenballungen von Gas und Sternen, die noch nicht mit anderen Systemen verschmolzen sind. Neuere Beobachtungen zeigen, dass in ihnen die Sternbildung besonders unregelmäßig abläuft, in kurzen Schüben mit langen Pausen dazwischen (siehe „Starbursts in Zwerggalaxien", Spektrum der Wissenschaft 10/2000, S. 30) In größeren Systemen wie unserer Galaxis hingegen entstehen Sterne mit einer recht gleichmäßigen Rate. Diese Befunde sind faszinierend, weil viele Astronomen angenommen hatten, die Masse einer Galaxie würde ihre Fruchtbarkeit bestimmen. Vielmehr scheint die Sternbildungsrate eher von den speziellen Anfangsbedingungen und von zufälligen Ereignissen bestimmt zu sein. Denn in kleinen Galaxien können Supernova-Explosionen leicht das Gas durcheinander wirbeln oder gar völlig aus dem System heraustreiben, was die Sternentstehung zum Erliegen bringt. Selbst die kleinsten Störungen können schon einen dramatischen Einfluss haben. Evevtuell ist diese Empfindlichkeit der Grund für die Vielgestalt der Zwerggalaxien.

Wenngleich das allgemeine Modell der Galaxienentstehung erstaunlich erfolgreich ist, haben die Forscher noch lange nicht alle beteiligten Prozesse im Griff. Und es bleiben bedenklich stimmende Widersprüche. Das einfache Bild von kühlendem Gas in einem Halo aus Dunkler Materie kann nämlich so nicht stimmen, weil das Gas derart rasant abkühlen müsste, dass alles im Zentrum landete und der intergalaktische Raum praktisch leer wäre. Weil der Raum zwischen den Galaxien aber alles andere als leer ist, muss das Gas durch eine zusätzliche Energiezufuhr daran gehindert worden sein, ganz auszukühlen.

Ein anderes Problem betrifft den Drehimpuls. Der Drehimpuls, den die Protogalaxien in den Modellen erhalten, ist mit demjenigen vergleichbar, den wir in den Spiralgalaxien tatsächlich sehen. Solange das Gas seinen Drehimpuls behält, vermag das CDM-Bild die beobachteten Größen der Spiralen zu erklären. Aber leider zeigen die Computersimulationen, dass sich der Drehimpuls verringert: Ein großer Teil geht während der Galaxienverschmelzung an die Dunkle Materie über. Im Ergebnis sind die Scheiben, die bei diesen Simulationen entstehen, nur ein Zehntel so groß, wie sie sein sollten. Offenbar sind die Modelle noch nicht vollständig.

Eine dritte Inkonsistenz betrifft die Anzahl der Zwerggalaxien. Die hierar-

Dichteschwankungen legten die Keime für Galaxien



Die Dichteschwankungen im frühen Universum erleichterten die Bildung von Protogalaxien. Diese Änderungen können durch ein Muster aus sich überlagernden Wellen dargestellt werden – ähnlich dem, was Musikexperten als „rosa Rauschen“ kennen. (Tatsächlich entstanden die Dichteschwankungen als Schallwellen im Urgas.) Kleine Wellen waren größeren überlagert, diese wieder noch größeren und so weiter. Deshalb erreichte die Dichte in den kleinsten Regionen ihren größten Wert. Diese Bereiche kollabierten als Erste und wurden die Keime für größere Strukturen.

SARA CHEN

chischen Theorien sagen eine große Zahl von Dunkelmaterie-Halos geringer Massen und somit auch von Zwerggalaxien voraus. Doch die Beobachtungen ergeben ein anderes Bild. In der Nachbarschaft des Milchstraßensystems liegt die Anzahl der Zwergsysteme mit geringer Masse um einen Faktor 10 bis 100 unter den Prognosen. Also gibt es diese Dunkelmaterie-Halos entweder nicht, oder aber sie haben sich der Entdeckung bisher entzogen, weil sich in ihnen keine Sterne bilden.

Angesichts dieser noch offenen Probleme plädiert ein Teil der Astronomen dafür, das Modell grundlegend zu ändern – zum Beispiel eine andere Art der Dunklen Materie anzunehmen. Die meisten aber wollen das bisherige CDM-Modell beibehalten, weil es die allgemeine Struktur des Universums und die Galaxienverteilung so gut erklärt. Sie sehen die Ursache der Mängel eher darin, dass die bisherigen Modellrechnungen den Prozess der Sternbildung nicht adäquat zu behandeln vermögen. Dieser Vorgang läuft nämlich auf Skalen ab, die viel kleiner sind als eine typische Galaxie. Um ihn angemessen zu berücksichtigen, müsste die Datenmenge in den Simulationen um ein Vielfaches gesteigert werden – doch das würde die heutigen Hochleistungsrechner weit überfordern.

Wir wissen bereits, dass sich die Sternbildung tiefgreifend auf die Struktur einer Galaxie auswirken kann (siehe „Das Gas zwischen den Sternen“, Spektrum der Wissenschaft 03/2002, S. 30). Manche Astronomen hoffen denn auch, damit gleich alle drei Probleme auf einmal lösen zu können. Die Energie, welche die Sterne freisetzen, kann das Gas aufheizen. Die Sterne könnten also die geforderte zusätzliche Energiequelle sein. Die Aufheizung verlangsamt auch den Fall des Gases zum Zentrum der Galaxie. Somit würde sich auch der Übertrag von Drehimpuls auf die Dunkle Materie verzögern – das zweite Problem wäre gelöst. Und Supernova-Explosionen könnten Materie aus den Galaxien zurück ins intergalaktische Medium schleudern (siehe „Gigantische Explosionen in aktiven Galaxien“, Spektrum der Wissenschaft 04/1996, S. 48). Für Halos mit sehr geringer Masse, deren Entweichgeschwindigkeit klein ist, könnte dieser Prozess so effizient sein, dass sie praktisch keine Sterne bilden – was erklären würde, warum wir weniger Zwerggalaxien sehen als vorhergesagt.

Weil wir diese Prozesse so schlecht verstehen, sind noch zu viele Parameter in den Modellen variierbar. Es wird sich zeigen, ob die bestehenden Probleme wirklich gelöst werden können oder ob sie vielmehr auf die Notwendigkeit eines völlig neuen Rahmenwerks hindeuten.

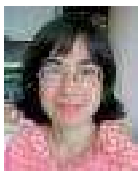
Unsere Theorie der Galaxienentstehung wird sich gewiss noch weiter entwickeln. Die Himmelsdurchmusterungen, die derzeit laufen, wie etwa der Sloan Digital Sky Survey, werden das Datenmaterial über nahe wie ferne Galaxien immens verbessern. Fortschritte in der Kosmologie werden die Anfangsbedingungen der Galaxienentstehung weiter einschränken. Präzise Beobachtungen der kosmischen Hintergrundstrahlung haben bereits die Werte der kosmologischen Parameter auf großen Skalen geliefert, sodass sich die Theoretiker jetzt auf die Feinarbeit konzentrieren können. Und schon bald können wir vielleicht das Große, das Kleine und das Mittlere zu einem lückenlosen Bild der kosmischen Evolution vereinigen. ■

Literaturhinweise

The Angular Momentum Content of Dwarf Galaxies: New Challenges for the Theory of Galaxy Formation. Von F. C. van den Bosch et al. in: Monthly Notices of the Royal Astronomical Society, Bd. 326, Heft 3, S. 1205 (21. September 2001).

The Formation of Ellipticals, Black Holes and Active Galactic Nuclei: A Theoretical Perspective. Von G. Kauffmann et al. in: Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Bd. 358, Heft 1772, S. 2121 (15. Juli 2000).

*Weblinks zum Thema finden Sie bei **www.spektrum.de** unter „Inhaltsverzeichnis“.*



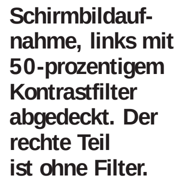

Guinevere Kauffmann *und* **Frank van den Bosch** *forschen beide am Max-Planck-Institut für Astrophysik in Garching. Ihre theoretischen Arbeiten zur Galaxienentstehung haben dieses Forschungsgebiet wesentlich vorangetrieben. Die Deutsch-Amerikanerin Kauffmann ist in Südafrika aufgewachsen und hat 1993 an der Universität Cambridge promoviert. Der Niederländer van den Bosch schloss seine Doktorarbeit 1997 an der Universität Leiden ab. Seit zwei Jahren ist er am Max-Planck-Institut für Astrophysik.*

1952

Kontraststeigerung bei Fernsehempfängern

Die außerordentlich hellen neuen Bildröhren ermöglichten die Anwendung von sogenannten „Kontrastfiltern“, deren Wirkung darauf beruht, daß von außen kommendes Licht zweimal durch sie hindurch muß, während das vom Fernsehbildschirm selbst erzeugte Licht das Filter nur einmal passieren muß. Nehmen wir als Beispiel ein Filter, das 50% des durchfallenden Lichtes absorbiert, so träfe auf den Bildschirm nurmehr die Hälfte des auffallenden Lichtes. Das von diesem wiederum reflektierte Licht würde, da es zum zweiten Male durch das Filter hindurch muß, um weitere 50% geschwächt, so daß also lediglich ein Viertel des auffallenden Lichtes zurückkäme. Das von der Fernsehröhre kommende Licht dagegen wird – da es das Filter nur einmal passieren muß – nur um 50% geschwächt, ein Lichtverlust, der sich durch die erhöhte Helligkeit der Fernsehröhre bequem ausgleichen läßt. *(Funkschau, 24. Jg., Heft 18, S. 364, 1952)*





Schirmbildaufnahme, links mit 50-prozentigem Kontrastfilter abgedeckt. Der rechte Teil ist ohne Filter.

Sturmwinde in der Ionosphäre

Wissenschaftler haben bei umfangreichen Untersuchungen der Ionosphäre mit radarähnlichen Geräten festgestellt, daß in Höhen zwischen 100 und 160 km Windgeschwindigkeiten bis zu 1800 km/h bei mittleren Geschwindigkeiten zwischen 240 und 320 km/h auftreten. Sie scheinen im Zusammenhang mit magnetischen Stürmen zu stehen. Raumschiffahrer brauchen allerdings diese ungeheuren Stürme nicht zu fürchten, weil bei der geringen Luftdichte in solchen Höhen deren Wirkung der eines Bodenwindes von 1,6 km/h vergleichbar ist. *(Physikalische Blätter, 8. Jg., Heft 9, S. 414, 1952)*

Brutplatz nach 167 Jahren entdeckt

Im Jahre 1785 entdeckten Forscher auf Tahiti einen merkwürdigen braunen Laufvogel von 40 bis 45 cm Länge, der an den Weichen borstenartig herausragende Federn trug und einen flötenähnlichen Laut von sich gab. *Numenius tahitiensis* … überwinterte auf Südseeinseln, doch wurden keine Brutplätze oder Nester gefunden. Aus diesem Grunde nahm man an, daß das Paarungsgeschäft anderweitig vor sich geht. … Ungeachtet aller bisherigen Bemühungen glückte es nie, auch nur ein einziges Gelege aufzufinden. Es bedurfte bedeutender finanzieller Mittel und des Einsatzes von Flugzeugen, um dieses Geheimnis nunmehr doch zu lösen. … Naturforscher konnten an den Präsidenten der National Geographic Society in Washington, D. C., die telegraphische Meldung senden, daß ihnen die Brutplätze des borstentragenden Brachvogels in den Tundren von Alaska aufzufinden gelungen ist. *(Naturwissenschaftliche Rundschau, 5. Jg., Heft 9, S. 385, 1952)*

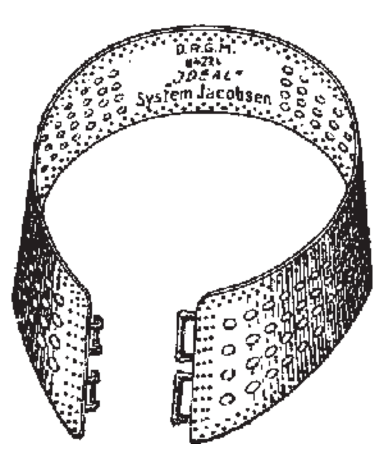


Gegen unhygienisches Ausspeien

Es wäre an der Zeit, dass auch in Deutschland, ähnlich wie es der „Lancet“, die bedeutendste medizinische Zeitschrift in England thut, zum Kampf gegen das Ausspeien gerufen würde. Die genannte Unsitte ist nicht nur ekelhaft, sondern hygienisch auch im höchsten Grad verwerflich. Die Verbreitung der Tuberkulose durch den Auswurf ist nachgewiesen, die der Influenza und der Katarrhe kaum zweifelhaft. … Alle Strafen und Zwangsmassregeln, die bei sonstigen Verunreinigungen üblich sind, dürften auch hier in Anwendung kommen. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 38, S. 757, 1902)*

Krageneinlage mit Ventilation

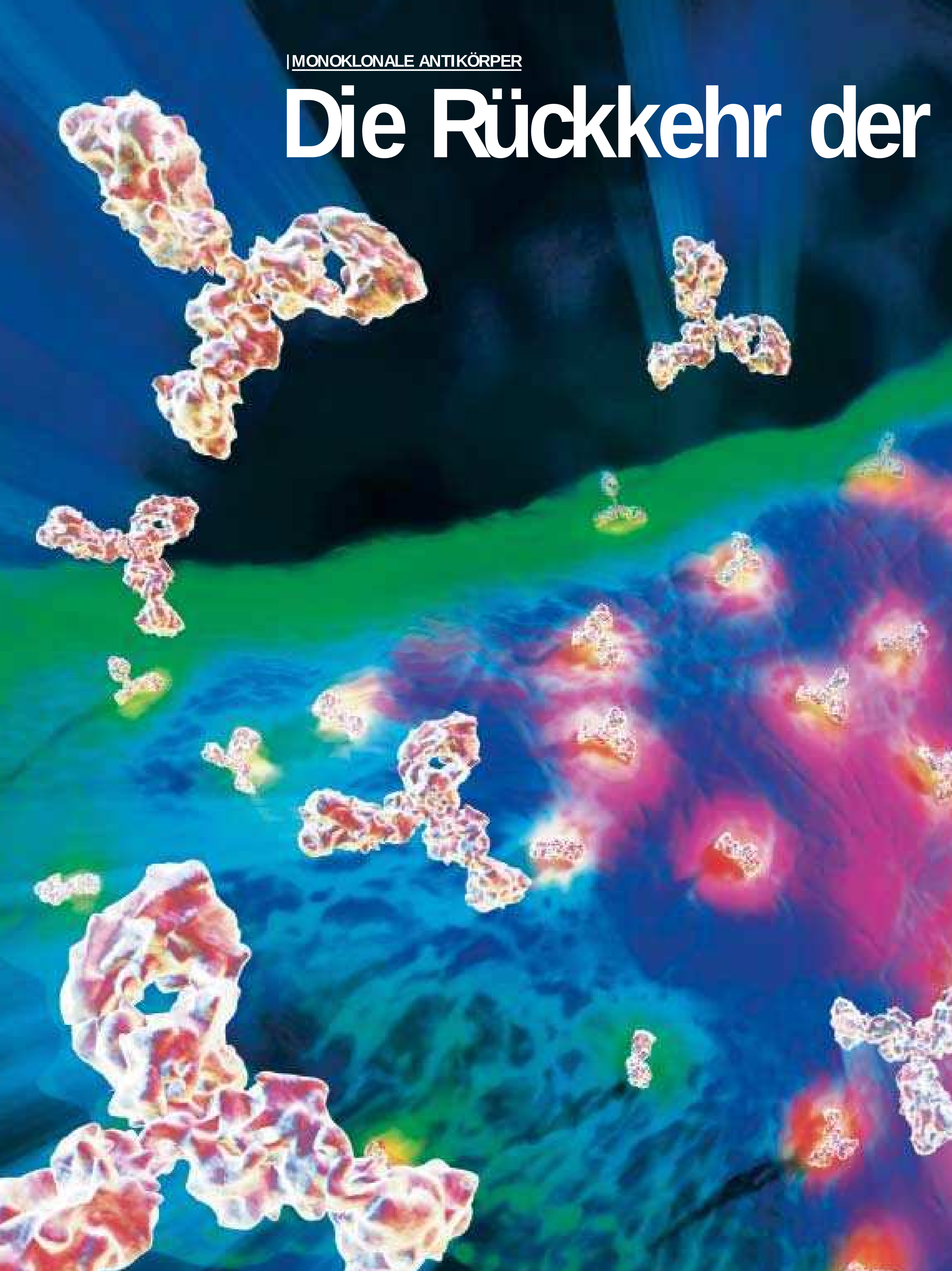
Die üblichen Einlagen für Kleiderkragen aus Leinwand, Wachstuch oder Celluloid haben den Nachteil, dass sie schlechten Geruch erzeugen, einknicken, weich werden und vor allem die Ausdünstung des Körpers hindern, da sie den Hals von der Luft fast hermetisch abschliessen. Um nun diese Übelstände zu beseitigen, hat die Fa. Bernhard Kühnau & Co. Krageneinlagen hergestellt, welche aus federnden Metallstreifen mit Ventilationslöchern bestehen. Damit das so zu Krageneinlagen verwendete Metall nicht rostet, ist es mit einem galvanischen Niederschlag überzogen. Ein mit einer derartigen Einlage versehener Kragen ist dünner und leichter als ein solcher mit einer der bisherigen Einlagen; auch knickt er nicht ein und hindert nicht die Ausdünstung des Körpers. *(Die Umschau, VI. Jg., No. 37, S. 738, 1902)*



Krageneinlage mit Ventilation

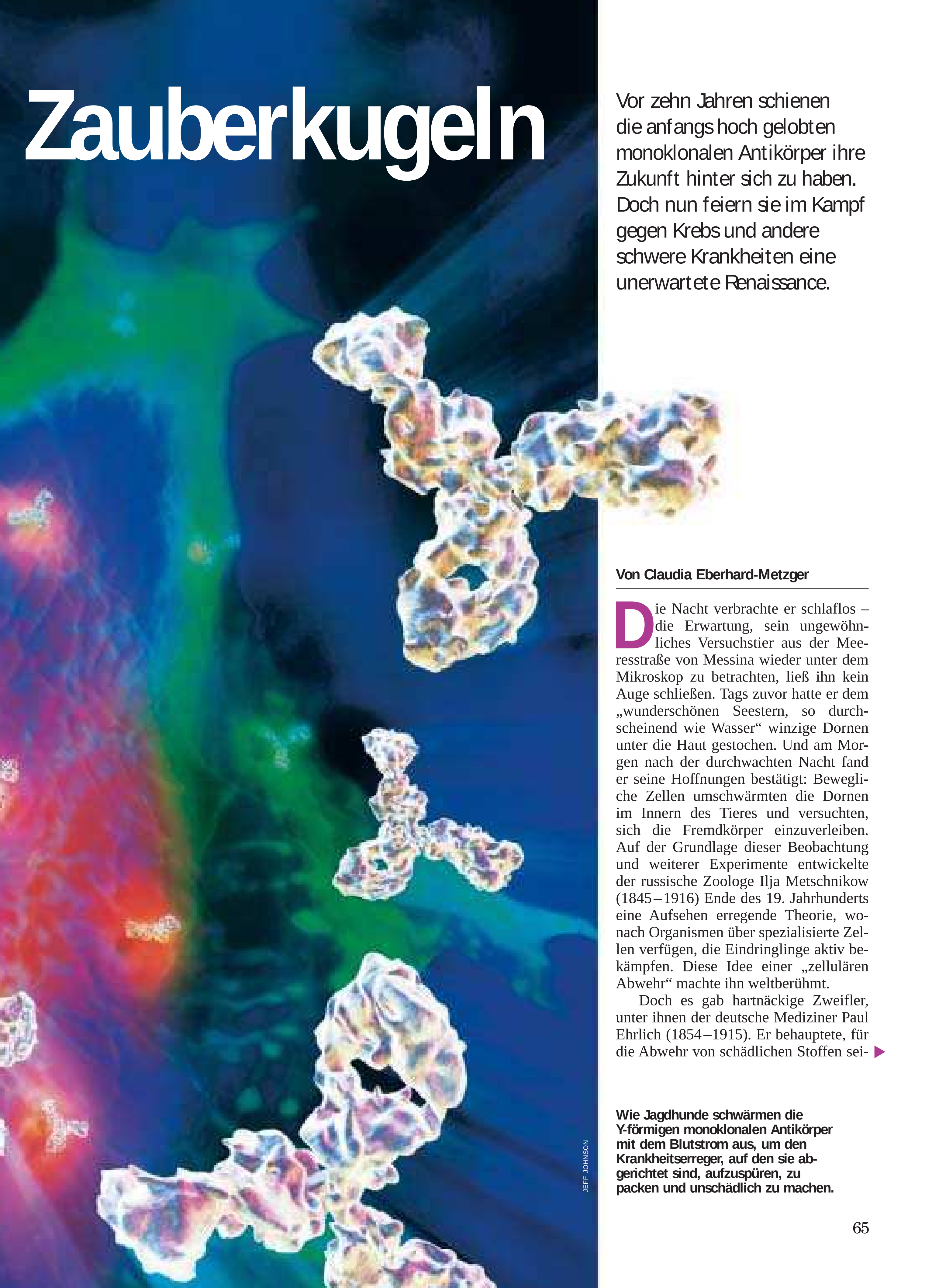
Spermien von Gebärmutter angelockt

Otto Löw zeigte, dass lebende Samenfäden von Ratten und von Kaninchen, in einem Tropfen indifferenter Flüssigkeit suspendiert und mit je einem Stückchen von der Uterusschleimhaut und einem Stückchen anderen Gewebes unter das Mikroskop gebracht, sich reichlich an dem erstgenannten Gewebe anhäufen, mit Energie sich in dasselbe einzubohren suchen, während sie der andere, von den verschiedensten Organen entnommene Gewebsanteil verhältnismässig kalt zu lassen scheint. … Ein Vergleich eines mit Soda-Lösung getränkten Papierstreifens mit einem solchen, der mit Uterusschleim getränkt war, ergab immer noch ein Ueberwiegen des letzteren in Bezug auf die Attraktionskraft für die Samenfäden. Somit war zugleich gezeigt, dass es das Sekret des Uterus, der Gebärmutter, ist, welches chemotaktisch wirkt. *(Naturwissenschaftliche Wochenschrift, Bd. XVII, Nr. 49, S. 595, 1902)*



Die Rückkehr der

Zauberkugeln



Vor zehn Jahren schienen die anfangs hoch gelobten monoklonalen Antikörper ihre Zukunft hinter sich zu haben. Doch nun feiern sie im Kampf gegen Krebs und andere schwere Krankheiten eine unerwartete Renaissance.

Von Claudia Eberhard-Metzger

Die Nacht verbrachte er schlaflos – die Erwartung, sein ungewöhnliches Versuchstier aus der Meeresstraße von Messina wieder unter dem Mikroskop zu betrachten, ließ ihn kein Auge schließen. Tags zuvor hatte er dem „wunderschönen Seestern, so durchscheinend wie Wasser“ winzige Dornen unter die Haut gestochen. Und am Morgen nach der durchwachten Nacht fand er seine Hoffnungen bestätigt: Bewegliche Zellen umschwärmten die Dornen im Innern des Tieres und versuchten, sich die Fremdkörper einzuverleiben. Auf der Grundlage dieser Beobachtung und weiterer Experimente entwickelte der russische Zoologe Ilja Metschnikow (1845–1916) Ende des 19. Jahrhunderts eine Aufsehen erregende Theorie, wonach Organismen über spezialisierte Zellen verfügen, die Eindringlinge aktiv bekämpfen. Diese Idee einer „zellulären Abwehr“ machte ihn weltberühmt.

Doch es gab hartnäckige Zweifler, unter ihnen der deutsche Mediziner Paul Ehrlich (1854–1915). Er behauptete, für die Abwehr von schädlichen Stoffen sei-

Wie Jagdhunde schwärmen die Y-förmigen monoklonalen Antikörper mit dem Blutstrom aus, um den Krankheitserreger, auf den sie abgerichtet sind, aufzuspüren, zu packen und unschädlich zu machen.

en keine besonderen Zellen, sondern lösliche Faktoren zuständig. Diese „Antikörper“ würden von Zellen als „Ballast“ abgeworfen, tauchten dann in Körperflüssigkeiten (lateinisch *humores)* auf und fänden, wie von Zauberhand gelenkt ihr Ziel, beispielsweise ein krank machendes Bakterium, das sie entschlossen angriffen und vernichteten. In ihnen sah Ehrlich auch das Vorbild für zukünftige Medikamente, die wie „Zauberkugeln“ den Urheber der Erkrankung aufspüren und selektiv zerstören sollten.

Jahrelang wogte der Streit darüber, wer denn nun Recht hätte: Metschnikow mit seiner „zellulären“ oder Ehrlich mit der „humoralen“ Abwehrkraft. Beide Mechanismen erwiesen sich dann Anfang des 20. Jahrhunderts als verknüpft: Sie bilden die zwei Hauptsäulen des Immunsystems. Von den neuen Erkenntnissen zur Krankheitsabwehr tief beeindruckt, verlieh die Schwedische Akademie der Wissenschaften 1908 beiden Kontrahenten gemeinsam den Nobelpreis für Medizin.

Hundert Jahre nach ihrer ersten Beschreibung stehen Ehrlichs humorale Faktoren wieder im Mittelpunkt der pharmazeutischen Forschung. In den Laboratorien weltweit versuchen Wissenschaftler, diese äußerst zielgenauen Waffen des Immunsystems als maßgeschneiderte „monoklonale“ Antikörper für ihre Zwecke einzuspannen – gegen Alzheimer, Krebs, Rheuma, Multiple Sklerose, Asthma oder Herz-Kreislauf-Erkrankungen. Es gibt kaum einen forschenden Arzneimittelhersteller, der sich nicht mit den Y-förmigen Molekülen und ihrem therapeutischen Potenzial beschäftigt.

Neun monoklonale Antikörper sind derzeit für den deutschen Markt zugelassen (siehe Tabelle auf Seite 72). Rund ein Dutzend steht weltweit nach erfolgreichen klinischen Prüfungen in der Warteschleife für eine Zulassung, weit über hundert werden auf ihre Eignung als neuartige Medikamente getestet.

Unter den biotechnisch hergestellten Pharmazeutika, die sich in der Entwicklung befinden, bilden monoklonale Antikörper inzwischen die zweitgrößte Gruppe. „Der anhaltende wissenschaftliche Fortschritt“, erklärt Gerhard Moldenhauer, Immunologe am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg, „hat der Antikörper-Therapie eine Renaissance beschert. Wir stehen am Anfang einer viel versprechenden Entwicklung.“ Diese überraschende Wendung wäre noch vor fünf Jahren niemandem denkbar erschienen. Damals hatten die meisten Wissenschaftler die einst hoch gelobte Waffe abgeschrieben.

Die abwechslungsreiche Karriere der monoklonalen Antikörper begann vor gut einem Vierteljahrhundert am Medical Research Council Laboratory der Universität Cambridge. Dort gelang es dem deutschen Immunologen Georges Köhler und seinem argentinischen Kollegen César Milstein im Jahre 1974, eine Krebszelle mit einem speziellen weißen Blutkörperchen, einer „*B*-Zelle“, zu verschmelzen. Heraus kam ein „Hybridom“, das die beiden auffälligsten Charakteristika seiner „Eltern“ in sich vereinte: die Fähigkeit der Krebszelle, sich unbegrenzt zu teilen, und die Fähigkeit der *B*-Zelle, unzählige, gleich aussehende Antikörper zu produzieren (siehe Kasten rechts). Damit wurde machbar, wovon Arzneimittelforscher seit langem geträumt hatten: die Produktion von beliebigen Mengen identischer Antikörper – oder Immunglobuline, wie sie auch genannt werden – mit vorgegebener Bestimmung in leicht handhabbaren zellulären Fabriken.

Köhler und Milstein veröffentlichten ihr neues Verfahren am 7. August 1975 in der Wissenschaftszeitschrift „Nature“. Es könnte, kommentierten damals beide mit kokettem Understatement, „für den medizinischen und industriellen Gebrauch von Nutzen sein“. Neun Jahre später erhielten sie für ihre Hybridom-Technik – den wichtigsten methodischen Fortschritt der Biomedizin in den 1970er Jahren – den Nobelpreis für Medizin.

In der Tat versprach das Verfahren eine Vielzahl faszinierender Anwendungen. Sie reichten vom detaillierten Studi-

IN KÜRZE

➤ Derzeit sind neun monoklonale Antikörper in Deutschland als Medikamente zugelassen, einige weitere stehen kurz vor der Marktreife. Ihr Einsatzspektrum ist breit: Sie verhindern Abstoßungsreaktionen nach Organverpflanzungen, unterdrücken chronische Entzündungen oder bekämpfen Krebs.

➤ Monoklonale Antikörper stammten bis vor kurzem von der Maus, sodass das menschliche Immunsystem sie als fremd erkannte und attackierte. Diese Unverträglichkeit war die Hauptursache früherer Misserfolge. Inzwischen gelingt die Herstellung monoklonaler Antikörper, die größtenteils oder ganz mit denen des Menschen identisch sind.

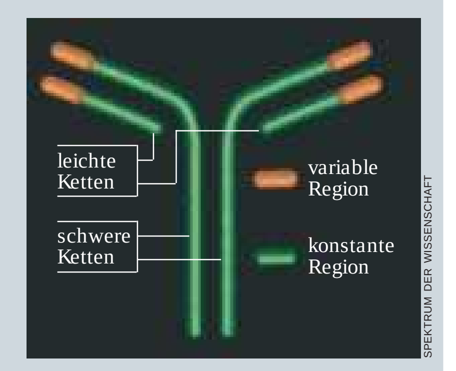
➤ Durch Verkoppeln monoklonaler Antikörper mit Giften oder radioaktiven Atomen lässt sich ihre zerstörerische Wirkung steigern. Auch hier gab es am Anfang Probleme, für die sich inzwischen jedoch Lösungen abzeichnen.

KURZPORTRÄT

Antikörper

Antikörper sind die Spürhunde des Immunsystems: Von so genannten *B*-Zellen produziert, schwärmen sie aus, um Krankheitserreger oder andere potenziell gefährliche Fremdkörper ausfindig zu machen. Dabei erkennen sie die Eindringlinge an bestimmten Merkmalen, die kleinen Flaggen gleich aus der Oberfläche beispielsweise eines Bakteriums herausragen. Die Immunologen nennen diese charakteristischen Strukturen Antigene. Hat sich der Antikörper an sie geheftet, löst er eine Kette biologischer Reaktionen aus, die mit der Zerstörung des Eindringlings endet.

Antikörper bestehen aus vier verschieden langen Ketten, die sich zu einem Y-förmigen Gebilde zusammenfügen (Bild). Die Ärmchen des Ypsilons haben am oberen Ende eine sehr variable Zusammensetzung. Mit dieser Region erkennen und binden die verschiedenen Antikörper ihr Antigen. Dagegen bildet der Stamm mit seinem einheitlichen Aufbau einen konstanten Bereich. Groben Schätzungen zufolge kann das menschliche Abwehrsystem mehrere zehn Millionen unterschiedliche Antikörpermoleküle hervorbringen – genug, um für jedes denkbare Antigen einen passenden Spürhund parat zu haben.



Aufbau der Y-förmigen Antikörper

um grundlegender biologischer Vorgänge über das technische Reinigen von Substanzgemischen bis hin zur präzisen Diagnose und zielgenauen, nebenwirkungsarmen Therapie von bisher unheilbaren Erkrankungen. Vor allem gegen Krebs schienen die monoklonalen Antikörper aussichtsreiche neue Wege zu eröffnen. Der Ansatz klang bestechend: Maßgeschneiderte Immunglobuline erkennen Tumorzellen mit untrüglicher molekularer Präzision an charakteristischen Oberflächenmerkmalen (Antigenen) und lagern sich an sie an. Dann setzen sie kraft ihres naturgegebenen Amtes eine Kette von Abwehrreaktionen in Gang, die erst endet, wenn die gefährliche Zelle eliminiert ist. Ehrlichs Zauberkugeln schienen Wirklichkeit zu werden.

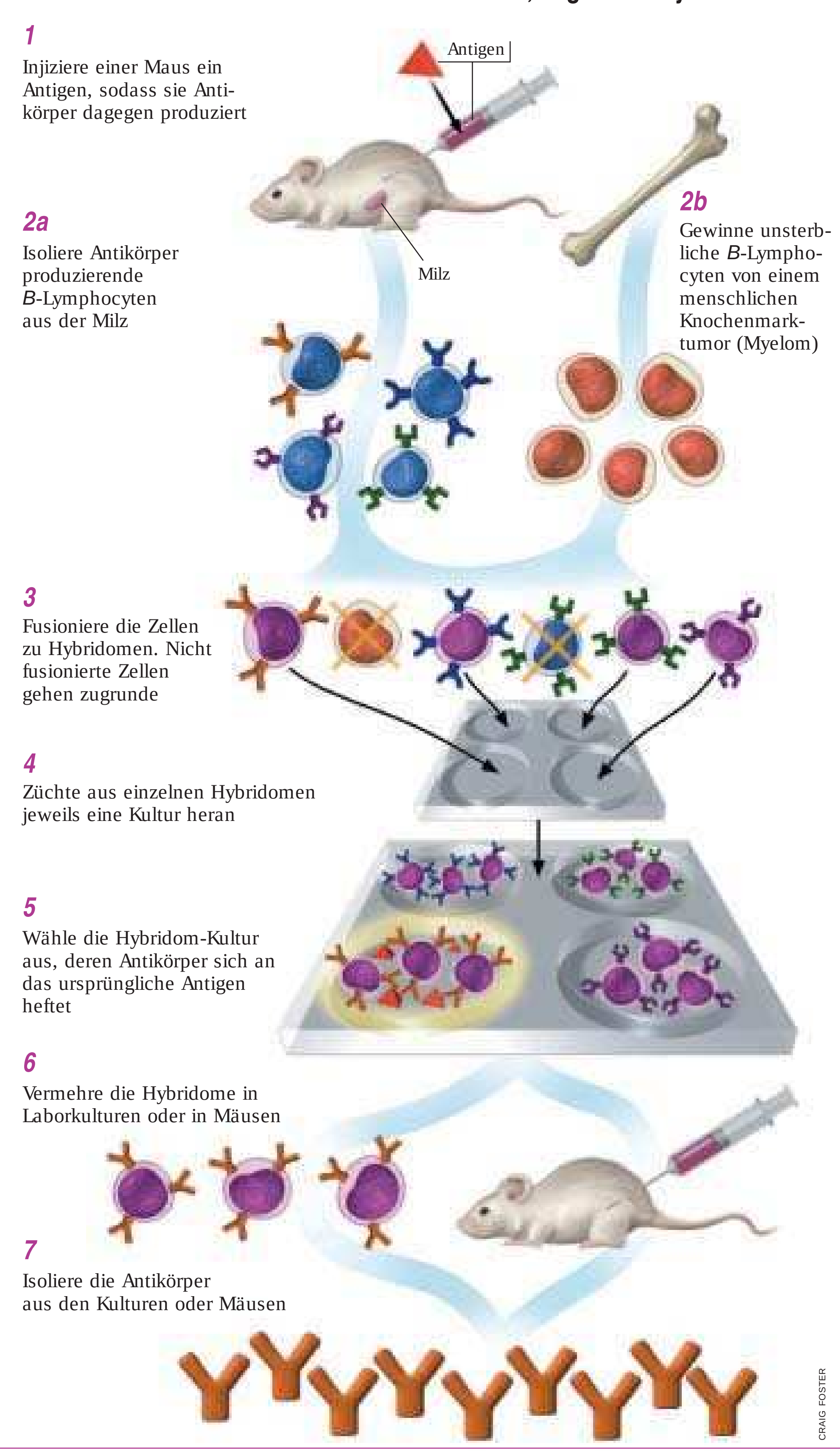
Der Auftakt des neuen Therapiekonzeptes war viel versprechend: Im Jahre 1982 verabreichten Ärzte der Stanford-Universität (Kalifornien) einem an Lymphdrüsenkrebs erkrankten Patienten einen auf den Tumor zugeschnittenen monoklonalen Antikörper und drängten seine Erkrankung damit zurück. Fortan zählten die Abwehrmoleküle in der akademischen wie industriellen Forschung weltweit zu den zukunftsträchtigsten Waffen gegen eine der größten Geißeln der Menschheit.

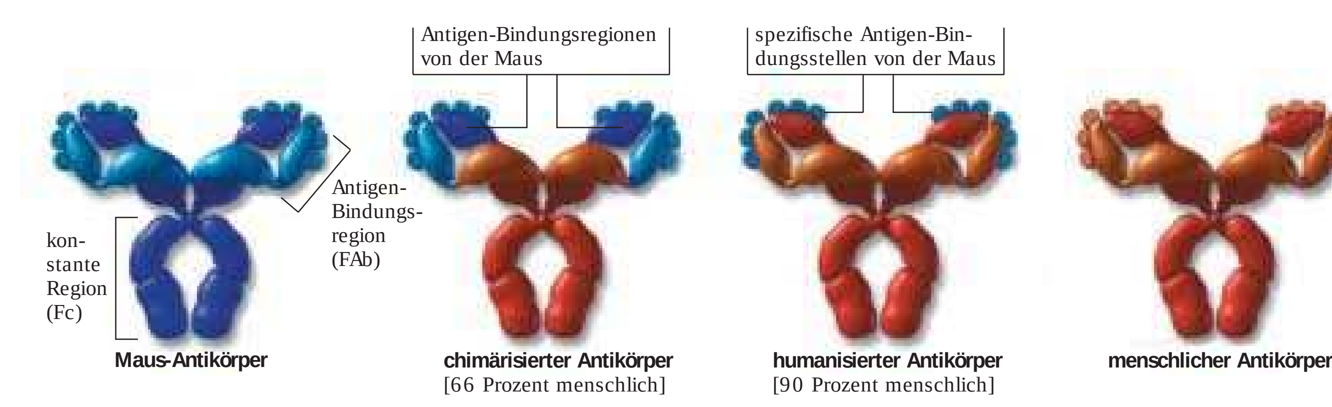
Enttäuschte Hoffnungen

Weitere Therapieversuche verliefen jedoch enttäuschend. Statt des erhofften Erfolgs offenbarten sich schwere Nebenwirkungen; einige Patienten starben sogar an den Folgen der Behandlung. Ende der 1980er Jahre war das Vertrauen in das therapeutische Potenzial der mit so viel Vorschusslorbeeren bedachten neuen „Wunderwaffen" deshalb auf dem Nullpunkt angelangt. Kein Wissenschaftler wollte mehr so recht daran glauben, dass sie jemals als Medikamente verwendet werden könnten.

Als einer der wichtigsten Gründe für die Misserfolge erwies sich die tierische Herkunft der Immunglobuline. Denn die nach der Hybridom-Technik gewonnenen Antikörper entstammen Mäuse-*B*-Zellen. Das von ihnen gebildete Y-Molekül besteht folglich aus tierischem Eiweiß, das vom menschlichen Immunsystem als fremd und potenziell gefährlich erkannt und deshalb angegriffen wird. Statt zur erwünschten Antitumor-Wirkung kommt es – vor allem bei mehrmaliger Anwendung – zu Abwehrreaktionen gegen das Medikament, die von harmlosen grippeähnlichen Symptomen bis hin zu schweren Schockzuständen reichen können.

Um das zu vermeiden, mussten die tierischen Produkte so weit wie mög- ▶





Die ersten monoklonalen Antikörper stammten von der Maus und lösten deshalb unliebsame Immunreaktionen im menschlichen Patienten aus. Inzwischen ist es mit gentechnischen Methoden gelungen, einen immer größeren Teil des Moleküls durch menschliches Material zu ersetzen.

lich „vermenschlicht“ werden. Das war jedoch nicht ohne weiteres möglich. Erst dank jüngster Fortschritte in der Gentechnik gelang es schließlich, menschliche Erbanlagen mit den Bauanleitungen für Abschnitte der Antikörpermoleküle in *B*-Zellen der Maus einzuschleusen. Den geänderten Konstruktionsplänen gemäß stellen die dortigen Eiweißfabriken nun menschenähnlichere Immunglobuline her.

Je nachdem, wie groß die menschlichen Anteile sind, spricht man von „chimärisierten“ oder „humanisierten“ Antikörpern: die chimärisierten bestehen zu rund 60, die humanisierten zu etwa 90 Prozent aus menschlichem Eiweiß. Bei Letzteren stammen nur noch die kleinen – aber entscheidenden – Antigen-Bindungsstellen vom Tier (Bild oben). Von den neun therapeutischen Antikörpern, die derzeit in Deutschland zugelassen sind, ist lediglich einer ganz von der Maus, vier sind Chimären und vier humanisiert (siehe Tabelle auf Seite 72).

Aber selbst die kleine Menge an Fremdprotein in einem zu 90 Prozent vermenschlichten Antikörper kann das Immunsystem auf den Plan rufen. Deshalb hieß das Ziel von Anfang an, komplett humane Antikörper herzustellen. Das gelingt seit Ende der 1990er Jahre mit Hilfe so genannter transgener Mäuse. Sie tragen von Geburt an menschliche Immunglobulin-Gene, da diese bereits in die Keimzellen transferiert wurden, aus denen die Tiere hervorgegangen sind. Werden die Mäuse dann mit einem ausgewählten Antigen immunisiert, produzieren sie den exakt dazu passenden humanen Antikörper.

Ob dieser Ansatz allerdings praktisch hält, was er theoretisch verspricht, muss sich noch erweisen. Bei der Firma Abbott in Ludwigshafen befindet sich der nach Firmenangaben „erste rein humane monoklonale Antikörper, der die Aktivität des Tumornekrosefaktors (TNF-alpha) blockiert“, bereits in einem fortgeschrittenen Entwicklungsstadium. Er soll gegen rheumatoide Arthritis helfen. Bei dieser Erkrankung sammelt sich TNF in den Gelenken an und löst eine entzündliche Reaktion aus, die zu Schwellungen, Schmerzen und Deformationen führt.

Der Antikörper namens Adalimumab kann nach den Ergebnissen der bisherigen klinischen Studien die Symptome der rheumatoiden Arthritis rasch und wirksam lindern. Er scheint nicht nur TNF, sondern auch bestimmte Metalloproteinasen auszuschalten. Das sind Enzyme, die bei der rheumatoiden Arthritis Knochen und Knorpel angreifen und die fortschreitende Gelenkzerstörung mit verursachen. Im April hat Abbott bei der zuständigen europäischen Behörde die Zulassung von Adalimumab beantragt. Wird sie gewährt, könnte das neue Medikament Mitte nächsten Jahres auf den Markt kommen.

Im Prinzip sollten die neuen TNF-alpha-Blocker gegen sämtliche Krankheiten helfen, bei denen der Tumornekrosefaktor eine Rolle spielt. Das betrifft nicht nur Rheuma, sondern alle entzündlichen Prozesse – von Allergien und Asthma über Darmerkrankungen und Multiple Sklerose bis hin zu Krebs. Allerdings können die Entzündungsblocker die Leiden nicht heilen, also ursächlich beheben, sondern nur die Symptome lindern (siehe Interview auf Seite 70).

Dies gilt auch für Omalizumab, das nächstes Jahr unter dem Namen Xolair auf den Markt kommen soll. Unter die Haut gespritzt, kann dieser monoklonale Antikörper freies Immunglobulin E (IgE) abfangen, das an allergischen Erkrankungen wie Heuschnupfen oder Asthma beteiligt ist. Es wird so daran gehindert, an die „Mastzellen“ des Immunsystems anzudocken und sie zur Ausschüttung allergieauslösender Stoffe zu veranlassen. Auf diese Weise kann Xolair die Überempfindlichkeit des Immunsystems verringern – nicht aber dauerhaft auf ein gesundes Normalmaß zurückfahren.

Im letzten Stadium der klinischen Prüfung, also Phase III, befindet sich derzeit auch Natalizumab (Handelsname Antegren). Es gehört zu einer neuen Klasse von Therapeutika, die sich an eine bestimmte Eiweißstruktur (Alpha-4-Integrin) auf der Oberfläche von weißen Blutkörperchen binden. So verhindern sie, dass die Immunzellen irrtümlich in das Nervensystem vordringen und dort Entzündungen auslösen, die als Ursache der Multiplen Sklerose gelten. In den bisherigen Studien erlitten Patienten, die mit Antegren behandelt wurden, weniger Krankheitsschübe, und ihr zentrales Ner-

KURZPORTRÄT

Monoklonale Antikörper

Jeder Krankheitserreger trägt mehrere verschiedene Oberflächenmerkmale, die als Antigen wirken können. Dadurch löst er die Bildung eines Gemischs unterschiedlicher Antikörper aus, die jeweils ein anderes solches Merkmal erkennen. Für die Forschung sowie die Diagnose oder Therapie von Erkrankungen sind derartige Gemische untauglich: Die Wissenschaftler können nicht unterscheiden, wo ein einzelner Antikörper genau angreift und wie er mit seinem Zielmolekül wechselwirkt.

Dazu braucht es Spürhunde, die alle gleich aussehen und dieselbe Antigen-Bindungsstelle haben. Bedingung dafür ist, dass sie von identischen Kopien einer einzigen *B*-Zelle – einem *B*-Zell-Klon – gebildet werden. Solche Antikörper bezeichnet man deshalb als monoklonal.

vensystems zeigte nicht so viele pathologische Veränderungen.

Große Hoffnungen ruhen auch auf einem monoklonalen Antikörper, der anscheinend fähig ist, in einer frühen Phase des Typ-I-Diabetes die Zerstörung der Insulin produzierenden Zellen in der Bauchspeicheldrüse aufzuhalten. Diese Form der Zuckerkrankheit tritt vor allem bei Kindern und jungen Erwachsenen auf. Eine klinische Studie der Columbia-Universität in New York hat ergeben, dass bereits eine einmalige Behandlung mit dem noch namenlosen Wirkstoff den Abbau der Insulin produzierenden Zellen für mindestens ein Jahr verzögert. Derzeit läuft eine größere Studie.

Designer-Antikörper

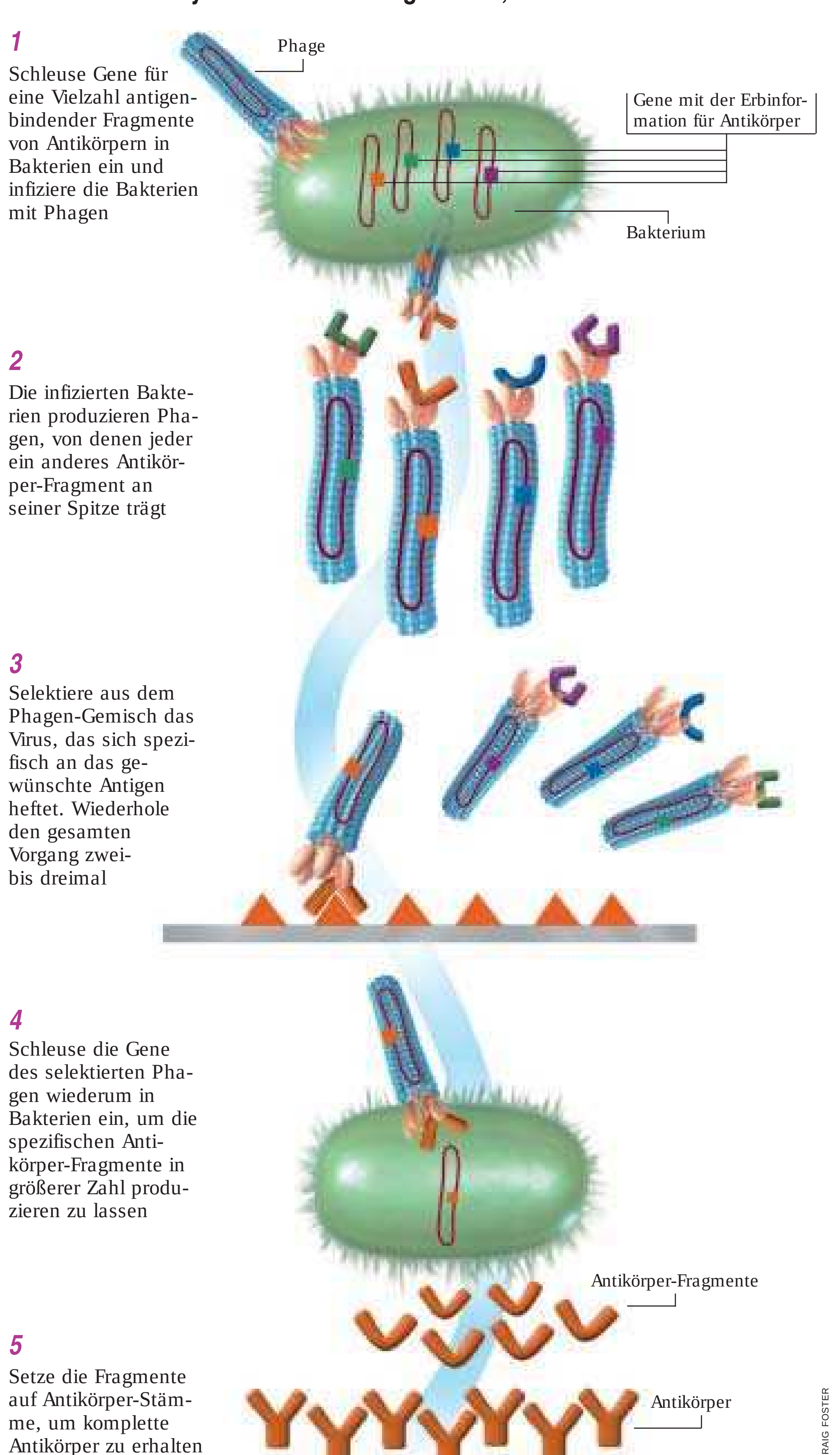
Für das neueste und eleganteste Verfahren zur Produktion monoklonaler Antikörper bedarf es weder fusionierter Zellen noch gentechnisch veränderter Tiere. Stattdessen bedient man sich so genannter Phagen: einer besonderen Art von Viren, die sich auf Bakterien als Opfer spezialisiert haben. Sie docken wie kleine Raumfähren an die Wand der vergleichsweise riesigen Mikroben an und injizieren ihr Erbgut mit einer zweckdienlich konstruierten ultrakleinen Spritze. Im Bakterium sorgt das virale Genom dann für seine rasante Vermehrung und den Zusammenbau neuer Viren.

Von diesem perfekten Gentransfer wollen die Antikörper-Ingenieure profitieren, indem sie mit Hilfe der Phagen menschliche DNA mit den Konstruktionsanweisungen für die Ärmchen des Y-Moleküls mitsamt den wichtigen Antigen-Bindungsstellen in ein Bakterium einschleusen (das gesamte Immunglobulin-Gen wäre zu groß für den Einbau in das Virus). Wenn dort dann neue Phagen entstehen, werden zugleich auch die gewünschten Antikörper-Fragmente gebildet. Sie lassen sich durch nachträgliches Anfügen des Y-Stamms vervollständigen (siehe Kasten rechts). Mit dieser so genannten Phage-Display-Technik kann man Millionen identischer Antikörper produzieren.

Die verbesserten Methoden zur Herstellung zielgenauer und sicherer monoklonaler Antikörper sind das eine Standbein, auf dem die großen Erwartungen an sie als Zauberkugeln ruhen. Das andere ist die Möglichkeit, die molekularen Spürhunde mit Eigenschaften auszustatten, die sie von Natur aus nicht haben. Um ihre zerstörerische Wirkung zu verstärken, können Wissenschaftler beispielsweise Gifte oder radioaktive Atome an das Grundmolekül koppeln. Dann entsteht ein so genanntes Immuntoxin. ▶

Herstellung monoklonaler Antikörper (Teil II)

An die Stelle von Hybridomen treten Phagen: Viren, die Bakterien befallen



Es soll mit der für den Antikörper charakteristischen Treffsicherheit eine Zielzelle aufspüren und dort sein „Anhängsel“ als tödliche Ladung deponieren.

Ein denkbares Gift für solche Kombipräparate ist Ricin, ein Glykoprotein aus dem Samen von *Ricinus communis*. Dieses mit Zuckerketten bestückte Eiweißmolekül unterbindet die für jedes zelluläre Leben essenzielle Proteinsynthese. Auch bakterielle Giftstoffe wie das Diphtherie-Toxin kommen in Frage. Es zerstört einen so genannten Elongations-Faktor im Innern der Zelle. Ohne ihn können Aminosäuren nicht zum lebenswichtigen Proteinfaden verknüpft werden.

So überzeugend das Konzept ist – in der Praxis haben die Immuntoxine bislang weitgehend versagt. In Therapiestudien zeigten sich schwere Nebenwirkungen, etwa das *vascular leak*-Syndrom mit Gewichtszunahme, Flüssigkeitsansammlungen, Blutdruckabfall und gestörter Nieren- und Lungenfunktion. Die unliebsamen Folgen rühren daher, dass die angekoppelten Giftstoffe die Endothelzellen zerstören, mit denen die Blutgefäße ausgekleidet sind: Die Adern werden undicht.

Außerdem rufen die Immuntoxine sehr schnell die körpereigenen Abwehrtruppen auf den Plan. Diese neutralisieren den Antikörper mitsamt seiner Giftfracht, bevor er auch nur in die Nähe seines Einsatzortes gekommen ist. Einen Ausweg bieten möglicherweise „Onconasen“ als angekoppelte zerstörerische Komponenten. Diese Enzyme aus Amphibien sind besonders klein, was sie für das Immunsystem schwer fassbar macht, und sehen einem menschlichen Enzym aus der Bauchspeicheldrüse verblüffend ähnlich. Deshalb sollten sie die Abwehr weniger stark oder gar nicht auf sich lenken. In ersten Untersuchungen entfaltete ein Immuntoxin mit einer Onconase eine unerwartet starke Aktivität gegen Tumoren: Es trieb die entarteten Zellen zum Selbstmord, zur Apoptose.

Spürhunde mit strahlender Fracht

Monoklonale Antikörper, die mit einem radioaktiven Element aufgerüstet worden sind, heißen Radioimmun-Konjugate. Die meisten Erfahrungen haben die Wissenschaftler mit den Isotopen Jod-131 und Yttrium-90, die zellzerstörende Beta-Strahlung aussenden.

Für eine Therapie mit Radioimmunkonjugaten eignen sich besonders Lymphome. Denn die entarteten weißen Blutkörperchen reagieren sehr empfindlich auf Beta-Strahlung. Bei klinischen Therapiestudien mit *B*-Zell-Lymphomen ließ der radioaktive Antikörper selbst große Tumoren verschwinden. Zwei Radioimmun-Konjugate stehen unmittelbar vor der klinischen Einführung: Zevalin und Bexxar, an die Yttrium-90 beziehungsweise Jod-131 angehängt ist.

Derzeit versuchen die Wissenschaftler auch, monoklonale Antikörper mit Radionukliden wie Bismuth-213 zu verkuppeln, die Alpha-Strahlen aussenden. Diese sind besonders energiereich und können Tumorzellen beispielsweise über Brüche in den Strängen der Erbsubstanz DNA zerstören. Bei einer ersten klinischen Studie am Memorial Sloan-Kettering Cancer Institute in New York zeigte ein derartiges Antikörper-Alpha-Strahler-Konjugat keine schwer wiegenden Nebenwirkungen. In Europa wird die Alpha-Immuntherapie derzeit am Deutschen Krebsforschungszentrum in Heidelberg erprobt.

Tumorzellen können nur überleben, weil sie es auf irgendeine Weise schaffen, ihren körpereigenen Scharfrichtern – den Killerzellen des Immunsystems – zu entgehen. An diesem Punkt setzt eine weitere neue Strategie zur Krebsbekämpfung an, welche mit „bispezifischen“ Antikörpern arbeitet. Diese werden künstlich aus zwei unterschiedlichen Molekülhälften zusammengesetzt, sodass sie – abweichend von ihren natürlichen Vorbildern – an den beiden Y-Ärmchen verschiedene Antigen-Erkennungsregionen tragen.

Dadurch können sie als Brücke fungieren: Der eine Arm greift eine Tumor-, der andere eine Killerzelle. Auf diese Weise wird der Scharfrichter quasi mit der Nase darauf gestoßen, dass hier ein Delinquent zu exekutieren ist. Die Killerzelle erfüllt daraufhin die ihr zugedachte Aufgabe: Sie schüttet einen Enzymcocktail aus, der die vom Antikörper unmissverständlich präsentierte Krebszelle zerstört.

Mehrere bispezifische Antikörper befinden sich derzeit in klinischen Tests der Phase I und II – zumeist zur Behandlung von Brust-, Prostata-, Darm- oder Lungenkrebs. Besonders viel versprechend ist ein Konstrukt der amerikanischen Firma Medarex, das sich an den für Tumorzellen charakteristischen Wachstumsrezeptor HER2 bindet. Es wird bereits in einer Phase-III-Studie an Patientinnen mit Eierstockkrebs getestet.

Die Arbeitsgruppe um Moldenhauer hat kürzlich einen ähnlichen Antikörper zur Behandlung dieser Tumorart entworfen. Er greift mit seinem einen Arm nach einem Oberflächenprotein namens Ep-CAM (*epithelial cell adhesion molecule*). Dieses Molekül kommt praktisch auf allen epithelialen Krebszellen vor ▶

INTERVIEW


KLAUS LANDRY, SPEYER

„Antikörper gehören zum Besten, was wir in der Medizin haben können“

Spektrum der Wissenschaft: Herr Professor Meuer, wie beurteilen Sie die überraschende Renaissance der monoklonalen Antikörper?

Stefan Meuer: Die Geschichte vom Aufstieg, Absturz und Wiederaufstieg haben die monoklonalen Antikörper mit vielen anderen wissenschaftlichen Entwicklungen gemeinsam: Zuerst wird etwas Sensationelles entdeckt und hochgejubelt; dann hält es den übergroßen Erwartungen nicht Stand und stürzt brutal ab – worauf sich viele lieber mit einem anderen Thema beschäftigen. Das ist in der Forschung manchmal ganz so wie an der Börse. Ich bin nicht sonderlich überrascht, sondern eher erstaunt darüber, dass man monoklonale Antikörper schon heute, noch keine drei Jahrzehnte nach der Entdeckung ihrer Herstellungsmethode, als effiziente Arzneimittel in der Klinik hat – trotz der mittlerweile sehr aufwendigen klinischen Prüfungen.

Spektrum: Was macht sie eigentlich so interessant?

Meuer: Antikörper sind bedeutende Funktionsträger der körpereigenen Abwehr. In den Jahrmillionen der Evolution

Professor Dr. Stefan Meuer
ist geschäftsführender Direktor des Instituts für Immunologie der Ruprecht-Karls-Universität Heidelberg. Er äußert sich zu Stand und Perspektiven des Einsatzes monoklonaler Antikörper.

waren sie den vielfältigsten Einflüssen ausgesetzt, die wir weder kennen noch nachahmen können. Auf diese Weise wurden die Antikörper von der Natur als sehr effiziente Werkzeuge perfektioniert. Damit gehören sie zum Besten, was wir in der Medizin haben können – sofern wir über die Methoden verfügen, sie für therapeutische Zwecke herzustellen. Diese Methoden sind in den letzten zwei Jahrzehnten rasant weiterentwickelt worden.

Spektrum: Welche monoklonalen Antikörper spielen heute bei welchen Erkrankungen eine nennenswerte Rolle?

Meuer: Von großer Bedeutung ist das Präparat Trastuzumab gegen metastasierten Brustkrebs. Auch zur Therapie bestimmter Blutkrebsarten gibt es mittlerweile sehr wirksame Antikörper. Im nicht-onkologischen Bereich sind die Antikörper gegen den Tumornekrosefaktor, einen Botenstoff des Immunsystems, hervorzuheben. Sie wirken sehr gut bei chronischen Entzündungen wie rheumatoider Arthritis oder entzündlichen Darmerkrankungen. Ihr Anwendungsspektrum wird sich meines Erachtens schon in naher Zukunft deutlich erweitern. Denn beim Tumornekrosefaktor, kurz TNF, handelt es sich um ein zentrales Molekül, das an vielen krankmachenden Entzündungsprozessen überall im Körper beteiligt ist. Und nicht zuletzt möchte ich den Klassiker OKT3 erwähnen, der schon 1986 auf den Markt kam. Er ist auch heute noch das Notfallmedikament, um akute Transplantat-Abstoßungen zu verhindern.

Spektrum: Können monoklonale Antikörper Krankheiten heilen?

Meuer: Bisher nicht, oder zumindest nicht allein. Bei Krebs können sie in Verbindung mit anderen Therapien zur Heilung beitragen. In allen anderen Fällen lindern sie nur Symptome oder zögern ein Fortschreiten der Erkrankung hinaus. Wird die Behandlung abgesetzt, ist auch die Krankheit wieder da. Bei den Antikörpern gegen TNF muss man sich die Frage stellen, ob dieser Therapieansatz überhaupt grundsätzlich stimmt. Möglicherweise wäre es ja viel besser, die Entzündung nicht zu unterdrücken, sondern zu verstärken – damit das Immunsystem etwas zu Ende bringen kann, was es offenbar in einer Art schwelendem Zustand hält, der chronisch krank macht.

Spektrum: Sind die hoch gelobten TNF-Blocker – also Entzündungshemmer, die am Tumornekrosefaktor ansetzen – damit hinfällig?

Meuer: Nein. TNF-Antikörper helfen den Patienten. Aber auf Dauer sind sie wahrscheinlich keine Lösung. Denn einen derart wichtigen Botenstoff wie TNF auf lange Frist zu neutralisieren, bedeutet immer auch, das Immunsystem zu schwächen. Die langfristigen Komplikationen sind nicht kalkulierbar. Zu ihnen könnte eine verstärkte Anfälligkeit für Infekte oder ein erhöhtes Krebsrisiko zählen. Trotz der bedeutenden Erfolge bei der Linderung von Symptomen darf man nicht vernachlässigen, die Wurzeln von Krankheiten zu erforschen und nach kausalen Ansätzen zu suchen.

Erfolge bei Krebs, Abstoßung und chronischen Entzündungen

Spektrum: Antikörper gelten als neue Wunderwaffe gegen Krebs – zu Recht?

Meuer: Ihre Bedeutung für onkologische Erkrankungen ist groß, allerdings im Sinne einer passiven Immuntherapie: Man verabreicht dem Patienten etwas, das sein Körper nicht bilden kann, und versetzt den Organismus so in die Lage, gegen Krebszellen vorzugehen. Der entscheidende Vorteil einer solchen Therapie ist, dass der Antikörper nicht alleine agiert. Er mobilisiert andere Zellen des Immunsystems, beispielsweise Fresszellen, und aktiviert so genanntes Komplement; insgesamt setzt er also eine Fülle biologischer Prozesse in Gang, die für eine erfolgreiche Immunantwort wichtig sind und die wir auch heute noch keineswegs vollständig verstanden haben. Weil Antikörper praktisch jeden Winkel des menschlichen Körpers erreichen können, eignen sie sich vor allem dazu, Tumorzellen zu eliminieren, die beispielsweise durch chirurgische Maßnahmen oder eine lokale Strahlentherapie nicht entfernt werden konnten. Dieses Konzept der so genannten adjuvanten Tumortherapie erscheint sehr plausibel. Außerdem wird eine Antikörpertherapie verglichen mit anderen Antikrebsmitteln gut vertragen.

Spektrum: Wie müsste der ideale Antikörper gegen Tumoren aussehen?

Meuer: Er sollte sich sehr stark und selektiv an eine Struktur heften, die ausschließlich und unveränderlich auf allen Tumorzellen vorkommt, nicht aber auf gesunden Zellen. Er müsste in der Lage sein, Tumorzellen effektiv abzutöten. Zudem sollte er Sekundärreaktionen hervorrufen, also die gesamte Schlagkraft des Immunsystems mobilisieren. Und er darf nicht immunogen sein, das heißt, er darf nicht die Aufmerksamkeit der Abwehr auf sich richten, was zu seiner sofortigen Eliminierung führen würde. Generell sollte er möglichst lange im Körper verweilen. Schließlich sollte er einfach, preiswert und in großen Mengen produzierbar sein.

Spektrum: Wird es diesen idealen Anti-Krebs-Antikörper jemals geben?

Meuer: Das ist eher unwahrscheinlich, weil es auch den Krebs nicht gibt, sondern viele verschiedene Krebserkrankungen mit unterschiedlichen Behandlungsbedürfnissen. Einige sehr interessante Ansätze zielen jedoch darauf ab, sich diesem Ideal punktuell zu nähern. Dazu gehört, den Antikörper mit Giften oder radioaktiven Substanzen zu koppeln, um seine Zerstörungskraft zu erhöhen. Viel versprechend sind auch speziell konstruierte bispezifische Antikörper, die Tumorzellen mit Killerzellen des Immunsystems zusammenbringen. Welche Strategie am chancenreichsten ist, lässt sich derzeit noch nicht absehen.

Spektrum: Sind monoklonale Antikörper die Medikamente der Zukunft?

Meuer: Ich bin überzeugt davon, dass man Antikörper künftig weniger als Medikamente anwenden wird, sondern mehr als Werkzeuge, um medizinisch sinnvolle Zielstrukturen aufzuspüren. Ist ein solches Target erst einmal erkannt, können mit den modernen Methoden der Arzneimittelforschung, etwa der kombinatorischen Chemie, gezielt kleine Moleküle gefunden und weiterentwickelt werden, die zwar die gleichen Effekte wie Antikörper haben, aber beispielsweise nicht in die Blutbahn gespritzt, sondern als Tablette eingenommen werden können. Ein weiterer Vorteil ist, dass solche Moleküle sehr viel einfacher und billiger herstellbar sind als die ziemlich teuren Antikörper.

Die Fragen stellte Claudia Eberhard-Metzger.

Derzeit in Deutschland zugelassene monoklonale Antikörper

Produkt	Hersteller	Zulassung	Typ	Anwendung	Erkrankung
Muromonab CD3 (Orthoclone® OKT3)	Ortho Biotech / Johnson & Johnson	1986	murin	CD3-Antigen auf *T*-Lymphocyten	akute Abstoßung von transplantierten Organen (Niere, Herz und Leber)
Abciximab (ReoPro®)	Centocor / Eli Lilly & Co.	1995	chimärisiert	Gerinnungs-Rezeptor (GP IIb/IIa) auf Blutplättchen	Blutpfropfbildung nach Ballondilatation bei Herzinfarkt-Patienten
Rituximab (Mabthera®)	IDEC Pharmaceuticals / Genentech / Roche	06/1998	chimärisiert	CD20-Rezeptor auf *B*-Lymphozyten	Non-Hopkins-Lymphom (rezidiv oder schwach refraktär)
Basiliximab (Simulect®)	Novartis	10/1998	chimärisiert	Interleukin-2-Rezeptor auf aktivierten *T*-Lymphozyten	akute Abstoßung von transplantierten Nieren
Daclizumab (Zenapax®)	Protein Design Labs / Roche	02/1999	humanisiert	Interleukin-2-Rezeptor auf aktivierten *T*-Lymphocyten	akute Abstoßung von transplantierten Nieren
Infliximab (Remicade®)	Centocor / Schering-Plough	08/1999	chimärisiert	Tumornekrosefaktor	rheumatoide Arthritis und Morbus Crohn
Palivizumab (Synagis®)	MedImmune / Abbott	08/1999	humanisiert	F-Protein des repiratorisch syncytialen Virus (RSV)	RSV-Infektionen bei Kindern
Trastuzumab (Herzeptin®)	Genentech / Roche	08/2000	humanisiert	HER2-Rezeptor für Wachstumsfaktor	fortgeschrittener Brustkrebs mit HER2-Rezeptor
Alemtuzumab (MabCampath®)	Millenium Pharmaceuticals / Schering	07/2001	humanisiert	CD52-Antigen auf *B*- und *T*-Lymphocyten	chronische lymphatische Leukämie

QUELLE: UFA, BERLIN (AKTUALISIERT IM MAI 2002)

(Abkömmlingen des Deckgewebes, das die Oberfläche und die inneren Hohlräume des Körpers auskleidet) und ist auf gesunden Zellen schwächer ausgeprägt. Der zweite Arm erfasst das CD3-Antigen, eine Oberflächenstruktur auf Killerzellen des Immunsystems.

„Schon mit geringen Mengen dieses bispezifischen Antikörpers konnten wir in Gewebekulturen Tumorzellen sehr wirksam zerstören“, erklärt Moldenhauer. Auch eine erste klinische Erprobung verlief viel versprechend. Schreitet die Eierstockerkrankung fort, kann ein Aszites, eine Flüssigkeitsansammlung von mehreren Litern, in der Bauchhöhle entstehen, was die Patientinnen erheblich beeinträchtigt. Bislang müssen die Ärzte die Aszitesflüssigkeit immer wieder punktieren, weil sie sich binnen Tagen nachbilden kann. In einer Pilotstudie injizierte Moldenhauers ärztlicher Kooperationspartner Alexander Marmé von der Universitäts-Frauenklinik Heidelberg elf Patientinnen mit fortgeschrittenem Eierstockkrebs und starker Aszitesbildung mehrmals den neuen Antikörper in die Bauchhöhle. „Bei neun Patientinnen verschwand der Aszites völlig“, berichtet Moldenhauer, „bei zweien konnte das Flüssigkeitsvolumen deutlich reduziert werden, ohne dass belastende Nebenwirkungen aufgetreten wären.“

Von diesem Anfangserfolg ermutigt, planen die Forscher jetzt, den neuen Antikörper auch bei Frauen in einem früheren Stadium der Krebserkrankung zu erproben. Sie wollen ihn unmittelbar nach der operativen Entfernung des Tumors in die Bauchhöhle einbringen. Dort soll er dann verbliebene Tumorzellen aufspüren, mit Killerzellen zusammenbringen und so der Zerstörung zuführen, bevor sie zu neuen Krebsherden heranwachsen können. Auf diese Weise hoffen die Forscher, das bislang hohe Rückfallrisiko von Patientinnen mit Eierstockkrebs zu verringern.

Überhaupt gilt das restlose Beseitigen vereinzelter Krebszellen, die nach einer Operation, Chemo- oder Strahlentherapie eventuell noch im Körper verblieben sind, als eine der Stärken der Tumortherapie mit monoklonalen Antikörpern. Das Tückische an Krebs ist ja, dass keine einzige entartete Zelle der Zerstörung entgehen darf. Nur wenn das gelingt, sind die Patienten auf Dauer vor einer Rückkehr ihrer Krankheit gefeit – also tatsächlich geheilt. „Es steht außer Frage“, bekräftigt Moldenhauer, „dass die Antikörper-gestützten Therapieverfahren dabei eine zentrale Rolle einnehmen werden.“

Nach einer langen Durststrecke scheinen die monoklonalen Antikörper also dabei zu sein, die in sie gesetzten Erwartungen doch noch zu erfüllen. Zwar ist ihr Einsatzbereich vorerst begrenzt, und manches theoretisch brillante Konzept stößt weiterhin auf praktische Hindernisse. Doch mangelt es nicht an Ansätzen, sie zu überwinden. Der Anfang ist gemacht – die ersten Antikörper-Medikamente haben ihre Bewährungsprobe bestanden. Vielleicht werden die visionären Zauberkugeln Paul Ehrlichs nicht die Medizin der Zukunft beherrschen, aber ein bedeutender Platz darin ist ihnen jetzt schon sicher. ■



Claudia Eberhard-Metzger *ist Wissenschaftsautorin mit Schwerpunkt Biomedizin. Sie arbeitet unter anderem für das Deutsche Krebsforschungszentrum und das Tumorzentrum Heidelberg-Mannheim. Ihr jüngstes Buch „Was ist was: Die Gene“ erschien im Tessloff-Verlag (Nürnberg 2001).*



Die Ungerechtigkeit der Wahlverfahren

THOMAS BRAUN / SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT

Ehrwürdige demokratische Traditionen schützen nicht vor Wahlergebnissen, die einen den Kopf schütteln lassen. Entspricht es wirklich dem Willen der Wählermehrheit, wenn George W. Bush zwei Millionen Stimmen weniger erhält als sein Konkurrent Al Gore und gleichwohl Präsident der USA wird? Oder wenn in diesem Frühjahr in Frankreich Lionel Jospin durch Jean-Marie Le Pen vom zweiten Platz verdrängt wird und daraufhin nicht zum zweiten Wahlgang der Präsidentschaftswahlen antreten kann?

Für die Wahl des deutschen Regierungschefs können die Wähler ihren Willen nur sehr indirekt ausdrücken: Sie werden gar nicht erst gefragt, wer Bundeskanzler werden soll. Das macht es für manche Wähler zweckmäßig, für eine andere Partei als die ihrer Wahl zu stimmen – mit dem Risiko, das Gegenteil des Beabsichtigten zu bewirken.

Kann wissenschaftliche Analyse solche paradoxen Situationen vermeiden und demokratischen Prinzipien stärker Geltung verschaffen? Die Antwort ist ernüchternd: Der Versuch, alle Paradoxa auszuschließen, endet in unauflöslichen Widersprüchen. Aber unter den durchwegs schlechten Verfahren gibt es auch weniger schlechte.

Der Mathematiker Michel Balinski beschreibt diese Theorie und die Praxis verschiedener Länder – eine beeindruckende Aufzählung von Fehlern (Seite 74). Die Statistiker Henri Carnal und Hans Riedwyl stellen die verschiedenen Methoden der Mandatszuweisung dar, die besonders den deutschen Bundestag betreffen (Seite 80).

In Teil IV im Oktober-Heft berichten wir über konkrete Problemfälle: das Parlament von Mexiko – und die Stadträte und Kreistage von Bayern.



Wer wird Präsident?

Welcher unter den Kandidaten soll als gewählt gelten? Derjenige, der dem Willen der Wähler am genauesten entspricht. Aber wie auch immer man dieses Ziel versteht, es ist unerreichbar. Immerhin lassen sich einige Betrügereien und Paradoxien samt zugehöriger Enttäuschung vermeiden.

Von Michel Balinski

Es ist schlicht abwegig zu glauben, dass in diesem Frühjahr mehr Franzosen den rechtsextremen Jean-Marie Le Pen zum Präsidenten haben wollten als den damaligen sozialistischen Regierungschef Lionel Jospin. Gleichwohl ergab sich genau diese Reihenfolge im ersten Wahlgang der französischen Präsidentschaftswahlen. Damit hat sich in krasser Form bestätigt, was ich im Original dieses Artikels (der vor der Wahl in „Pour la Science“ erschienen ist) nur als Vermutung äußern konnte: Wahrscheinlich ist ein anderer Präsident gewählt worden als der, den die Wähler wirklich wollten.

Jean-Charles Chevalier de Borda (1733–1799), ein vielseitiger Mathematiker, hat schon 1770 argumentiert, dass diese Situation immer dann eintreten kann, wenn mehr als zwei Kandidaten zur Wahl stehen. In der Zwischenzeit ist diese abstrakte Möglichkeit mehrfach realisiert worden, zu verschiedenen Zeiten und unter Anwendung verschiedener Verfahren. Wie kann es dazu kommen?

Der amerikanische Fehler: die Mehrheitswahl

In den USA werden die Senatoren in einer Mehrheitswahl mit einem einzigen Wahlgang bestimmt. (Jeder Bundesstaat hat zwei Senatoren, aber wegen überlappender Amtszeiten geht es bei jeder Wahl höchstens um einen Senatssitz pro Bundesstaat.) Jeder Wähler gibt einem Kandidaten seine Stimme, und es gewinnt der Bewerber mit der größten Stimmenzahl. Bei der Wahl von 1970 im Staate New York kandidierten James Buckley, der dem rechten Flügel der Republikaner angehörte und für die konservative Partei antrat, Richard Ottinger, ein gemäßigter Demokrat, sowie Charles Goodell vom linken Flügel der Republikaner, der sowohl von seiner Partei als auch von den Liberalen vorgeschlagen worden war. Buckley wurde mit 39 Prozent der Stimmen gewählt, Ottinger erreichte 37 Prozent und Goodell 24 Prozent. War Buckley wirklich der vom Wahlvolk gewünschte Senator?

Wohl nicht. Es ist nämlich anzunehmen, dass ein Buckley-Wähler lieber Goodell als Ottinger gehabt hätte und ein Ottinger-Wähler lieber Goodell als Buckley. Die Wähler, die für Goodell gestimmt hatten, hätten in einem Vergleich zwischen Buckley und Ottinger evetuell eine leichte Präferenz für Letzteren gehabt (Kasten rechts). In einer Stichwahl hätte Goodell sowohl gegen Ottinger als auch gegen Buckley gewonnen.

> Man nimmt allgemein an (und dieser Ansicht ist meines Wissens nie widersprochen worden), dass in einer Wahl die Mehrheit der Stimmen dem Wunsch der Wähler entspricht, dass also der Kandidat, der diese Mehrheit erreicht, notwendigerweise derjenige ist, den die Wähler seinen Konkurrenten vorziehen. Ich werde jedoch zeigen, dass diese Meinung wohl für eine Wahl zwischen zwei Kandidaten zutrifft, in allen anderen Fällen aber falsch sein kann.
>
> *Jean-Charles Chevalier de Borda am 16. Juni 1770 in einer Sitzung der Académie Royale des Sciences*

Was braucht es mehr, um zu rechtfertigen, dass Goodell derjenige war, den die Wähler wirklich wollten? Dieses Prinzip vertrat der Marquis de Condorcet (1743–1794; Bild Seite 77): „Es soll jeder Wähler seinen Willen vollständig ausdrücken, indem er jeweils zwei Kandidaten vergleicht, und aus dem Ergebnis der Mehrheitsentscheidungen für all diese Vergleiche soll der allgemeine Wille abgeleitet werden.“ Ein Bewerber wie Goodell, der jeden einzelnen Gegenkandidaten aussticht, wird der Condorcet-Sieger dieser Wahl genannt.

Dieselbe Idee ist schon bei dem mittelalterlichen Universalgelehrten Ramón Llullo (Raimundus Lullus, um 1234–1316) zu finden.

Der französische Fehler: zwei Wahlgänge

In Frankreich wird das Mehrheitswahlsystem mit zwei Wahlgängen praktiziert. Jeder Wähler verfügt wieder über eine einzige Stimme. „Der Präsident der Republik wird nach der absoluten Mehrheit der gültigen Stimmen gewählt. Wird diese im ersten Wahlgang nicht erreicht, so findet am übernächsten Sonntag ein zweiter statt. Zugelassen sind dann nur die ersten zwei Kandidaten …“ (Artikel 7 der französischen Verfassung). Ähnlich lautet die Regel für die Parlamentsmitglieder, wobei jedoch im zweiten Wahlgang jeder Kandidat antreten darf, der im ersten mindestens 12,5 Prozent der Stimmen erhalten hat.

Wären also Buckley, Goodell und Ottinger Präsidentschaftskandidaten in Frankreich gewesen, so wäre Goodell nach dem ersten Wahlgang ausgeschieden und Ottinger im zweiten gewählt worden. Bei Parlamentswahlen hätte

Senatswahl im Staate New York 1970

Mit korrekter Auszählung den Falschen gewählt

Prozent der Wähler	39	37	10	14
Reihenfolge in der Beliebtheitsskala	Buckley	Ottinger	Goodell	Goodell
	Goodell	Goodell	Buckley	Ottinger
	Ottinger	Buckley	Ottinger	Buckley

	Buckley	Goodell	Ottinger
Buckley	–	39	49
Goodell	61	–	63
Ottinger	51	37	–

Vermutlich hätten die Wähler des Staates New York die drei Kandidaten in die links oben dargestellte Rangfolge gebracht, wenn sie danach gefragt worden wären. Beispielsweise wäre für die 39 Prozent, die für Buckley stimmten, Goodell und nicht Ottinger die zweite Wahl gewesen, und so weiter. Daraus ergibt sich die Tabelle oben rechts: In jedem Feld ist verzeichnet, wie viele Wähler den Kandidaten der zugehörigen Zeile dem Kandidaten der zugehörigen Spalte vorziehen würden. Beispiel (dritte Zeile, erste Spalte): In einer direkten Konfrontation würde Ottinger gegen Buckley mit 51 Prozent gewinnen. Goodell ist der Condorcet-Sieger, da er jeden anderen Kandidaten im direkten Vergleich besiegt. Gleichwohl kam er mit 24 Prozent auf den letzten Platz.

Mit einer anderen Vermutung für die Präferenzen der Wähler (unten) ist die Situation noch verwirrender: Es gibt keinen Condorcet-Sieger. Vielmehr würde jeder Kandidat gegen den Sieger eines Zweikampfs unter den beiden anderen gewinnen. Es kommt also auf die Reihenfolge der Abstimmungen an.

Prozent der Wähler	27	12	16	2	10	14
Reihenfolge in der Beliebtheitsskala	Buckley	Buckley	Ottinger	Ottinger	Goodell	Goodell
	Goodell	Ottinger	Goodell	Buckley	Buckley	Ottinger
	Ottinger	Goodell	Buckley	Goodell	Ottinger	Buckley

	Buckley	Goodell	Ottinger
Buckley	–	60	49
Goodell	40	–	51
Ottinger	51	49	–

ALLE GRAFIKEN: PLS

Goodell am zweiten Wahlgang teilnehmen dürfen, aber wohl ohne Erfolgsaussichten. Also wird auch mit diesem System der „richtige“ Kandidat nicht gewählt.

Höchstwahrscheinlich hat es eine vergleichbare Situation bereits bei den französischen Präsidentschaftswahlen von 1988 gegeben (Kasten Seite 76 oben). Es ist kaum zu bezweifeln, dass Raymond Barre im Zweikampf gegen Jacques Chirac gewonnen hätte. Es ist weniger sicher, wird aber von vielen für wahrscheinlich gehalten, dass er auch François Mitterrand geschlagen hätte. Doch Barre kam nicht über den ersten Wahlgang hinaus.

Der australische und irische Fehler: die Vorzugswahl

Australien und Irland kennen die Vorzugs- oder Alternativwahl (*preference voting* oder *alternative voting*). Jeder Wähler bestimmt unter allen Bewerbern seine erste, zweite, …, letzte Wahl (in Australien muss er alle Kandidaten in eine Rangfolge bringen, sonst ist sein Stimmzettel ungültig). Jeder Stimmzettel besteht also – theoretisch – aus einer Folge von Plätzen, auf die der Wähler in der Reihenfolge seiner Präferenzen die Kandidaten setzt.

Hat ein Kandidat die Mehrheit der ersten Plätze, so ist er gewählt. Andernfalls wird der Kandidat mit der geringsten Anzahl an ersten Plätzen von allen Stimmzetteln gestrichen, und die anderen Kandidaten rücken in die dadurch frei gewordenen Plätze auf. Insbesondere gelten die Kandidaten, die den zweiten Platz hinter dem Gestrichenen belegt hatten, nunmehr als erste Wahl dieser Wähler. Man prüft nun, ob nach dieser Aufwertung ein Kandidat eine Mehrheit an ersten Plätzen erreicht. Dieser gilt dann als gewählt; ansonsten wird das Verfahren nach dem gleichen Prinzip weitergeführt.

Was wäre das Ergebnis bei der Wahl des Senators von New York gewesen? Hätten die Wähler ihre Präferenzen nach der Tabelle im Kasten oben angegeben, so hätte es zuerst keine Mehrheit an ersten Plätzen gegeben. Goodell wäre dann ausgeschieden, und Ottinger hätte mit 51 Prozent der neuen ersten Plätze gesiegt: auch hier eine „falsche“ Wahl.

Schlimmer noch: Ein Kandidat kann unter Umständen dadurch verlieren, dass gewisse Wähler ihre Meinung zu seinen Gunsten ändern. Der Beweis steht im Kasten Seite 76 unten: 15 Prozent der Wähler, die ursprünglich $B > C > D > A$ gestimmt hätten, lassen sich durch eine Rede von A überzeugen und entscheiden sich neu für die Rangfolge $A > B > C > D$. Sonst bleibt alles gleich. Das Ergebnis: A, der ursprünglich gesiegt hätte, verliert nun gegen D, obwohl er von mehr Wählern bevorzugt wird als zuvor. Eine schreiende Ungerechtigkeit!

Da nun alle diese Systeme unter schwer erträglichen Widersprüchen leiden: Warum erklärt man nicht einfach den Condorcet-Sieger für gewählt? Weil es ihn nicht immer gibt. Nehmen wir als Beispiel abermals die Senatorenwahl von New York 1970, unterstellen jedoch den Wählern etwas andere Präferenzen, die immer noch mit dem tatsächlichen Wahlergebnis in Einklang sind (Kasten oben, untere Tabelle). In einem direkten Zweikampf würde Buckley jetzt Goodell besiegen (mit 60 Prozent), Goodell würde mit 51 Prozent der Präferenzen über Ottinger triumphieren, aber überraschenderweise würden 51 Prozent der Wähler Ottinger vor Buckley setzen. Damit hätten sie die Kandidaten in die absurde Rangfolge $B > G > O > B$ gebracht. Das ist das Paradox von Condorcet.

Arrows Paradox

Hier gewinnt jeder Kandidat gegen den Sieger der Konfrontation zwischen den anderen. Bei einem zweistufigen Wahlmodus, in dem der dritte Kandidat erst in der zweiten Runde gegen den Sieger der ersten antritt, wird jeder versuchen, den ersten Wahlgang zu vermeiden. Die Reihenfolge der Abstimmungen spielt eine wichtige Rolle, wie jeder weiß, der in ▶



Französische Präsidentschaftswahlen von 1988

Keine Chance für den Wunschkandidaten

Waechter	Laguiller	Boussell-Lambert	Lajoinie	Juquin	Mitterrand	Barre	Chirac	Le Pen
3,9	2,0	0,4	6,7	2,1	34,1	16,5	20,0	14,4

Diese Tabelle zeigt die Kandidaten samt ihren Stimmenanteilen in Prozent, nach ihrer politischen Orientierung von links nach rechts angeordnet. Unter zwei Kandidaten wird sich der Wähler stets für denjenigen entscheiden, der seiner eigenen politischen Orientierung näher ist. Unter dieser – plausiblen – Annahme war Raymond Barre der Condorcet-Sieger der Wahl: Seine 16,5 Prozent und die Stimmen der Kandidaten linker Parteien addieren sich zu 65,6 Prozent, womit er Chirac geschlagen hätte. Andererseits ist die Summe der Stimmen rechts von Mitterrand immerhin 50,9 Prozent. Aber das half nichts, denn Barre schied im ersten Wahlgang aus.

irgendeinem Gremium an Beschlussfassungen teilgenommen hat.

Kenneth Arrow, Wirtschaftswissenschaftler an der Universität Stanford (Kalifornien), hat das Paradox von Condorcet erheblich verallgemeinert (und erhielt dafür 1972 den Nobelpreis der Wirtschaftswissenschaften). Ist es möglich, die Ranglisten der einzelnen Wähler in sinnvoller Weise zu einer für das gesamte Wahlvolk gültigen Rangliste zusammenzufassen (nennen wir sie die „Bundesrangliste“)? Dabei ist unter „sinnvoll“ nur die Befolgung dreier vernünftiger, bescheidener, ja fast harmloser Regeln zu verstehen:

➤ Wenn alle Wähler in ihren Listen *A* vor *B* setzen (ein sehr seltenes Ereignis!), so muss auch in der Bundesrangliste *A* vor *B* stehen.

➤ Wenn die Wähler ihre Meinung dergestalt ändern, dass *A* von keinem Wähler schlechter als vorher eingestuft wird, so darf er in der Bundesrangliste nicht zurückfallen.

➤ Die Reihenfolge von – beispielsweise – drei Kandidaten in der Bundesrangliste darf nur von ihrer Reihenfolge in der Rangliste der einzelnen Wähler abhängen und nicht etwa von den Rängen anderer Kandidaten.

Arrow bewies, dass dieses Problem bei einer Wahl mit mindestens drei Kandidaten nur eine Lösung besitzt: Die Rangliste eines einzelnen Wählers (des „Diktators“) wird zur Bundesrangliste erklärt. Die einzige zulässige Lösung eines scheinbar harmlosen Problems der Demokratie ist höchst undemokratisch: die Diktatur eines Einzelnen! Trotzdem müssen in einer Demokratie Abgeordnete, Bürgermeister und Ratsmitglieder gewählt werden.

Die Methode von Borda

Manche schwören auf ein von dem vielseitigen Wissenschaftler Jean-Charles Chevalier de Borda (1733–1799) vorgeschlagenes Verfahren als ein Allheilmittel. Es wurde hier und da verwendet, unter anderem eine Zeit lang für die Wahlen zur französischen Akademie der Wissenschaften, ist aber zurzeit nirgends in Gebrauch. Borda hatte in seiner eingangs zitierten Schrift kritisiert, dass der Wähler seine Meinung nur unvollständig ausdrücken kann, und schlug vor, dass die Wähler Präferenzlisten aufstellen wie bei der Vorzugswahl, dass aber diese Listen in Punktwertungen umgesetzt werden. Bei sechs Bewerbern bekäme der Höchstplatzierte 5 Punkte, der Kandidat der zweiten Wahl 4 Punkte, bis hinunter zu 0 Punkten für den letzten Kandidaten. Im Endeffekt bekommt jeder Kandidat so viele Punkte, wie er – in den Augen dieses speziellen Wählers – Zweikämpfe gewinnen würde. Diese Punktzahlen werden addiert, und der Kandidat mit der höchsten Gesamtpunktzahl gewinnt.

Bei der Senatorenwahl von 1970 und den im Kasten S. 75 genannten Präferenzen hätte Buckley $2 \times 39 + 10 \times 1 = 88$ Punkte erhalten, Goodell 124 und Ottinger 88. Goodell, der Condorcet-Kandidat, hätte also haushoch gewonnen.

Trotzdem hat diese Methode mehrere Nachteile. Das erfundene Beispiel im Kasten auf Seite 78 zeigt, dass der Condorcet-Sieger *A* von *C* geschlagen wird. Auch ist die dritte Bedingung von Arrow nicht erfüllt: Wenn sich die schwächsten Kandidaten *D*, *E* und *F* zurückziehen, erhält *B* plötzlich 117 Punkte, *A* 105 und *C* 77. Bei sechs Bewerbern ist also die Rangliste *C* > *A* > *B*, bei nur dreien je-

Der Konstruktionsfehler der Vorzugswahl

Eine überzeugende Rede kann schädlich sein

	Vor der Rede von *A*				Nach der Rede von *A*			
Prozent der Wähler	15	24	29	32	15	24	29	32
Rangfolge in der Vorzugswahl	*B C D A*	*C D A B*	*D A C B*	*A D C B*	*A B C D*	*C D A B*	*D A C B*	*A D C B*

Nehmen wir an, unter den vier Bewerbern *A*, *B*, *C* und *D* soll durch Vorzugswahl entschieden werden. Die Präferenzen der Wähler sind in der linken Tabelle aufgezeichnet. Zum Beispiel würden (zweite Spalte) 24 Prozent der Wähler am liebsten *C* auf dem Posten sehen, ersatzweise *D*, dann *A* und an letzter Stelle *B*. Bei diesem Wahlergebnis würde nach den Regeln der Vorzugswahl zuerst Kandidat *B* gestrichen, dann *D*. Unter den beiden verbliebenen Kandidaten hätte daraufhin *A* die Mehrheit.

Nun gelingt es *A*, in einer flammenden Rede die 15 Prozent der Wähler, die bisher nichts von ihm hielten, für sich einzunehmen. Diese setzen ihn auf den ersten statt auf den letzten Platz (rechte Tabelle). Bei der Vorzugswahl scheiden dann nacheinander *C* und *B* aus – und *A* verliert gegen *D*! Sein Erfolg hat ihn sein Amt gekostet.

doch genau umgekehrt: $B > A > C$. Also könnte die Wahl durch Störkandidaturen verfälscht werden.

Obendrein könnte ein Wähler dazu neigen, die gefährlichsten Rivalen seines Wunschkandidaten an den Schluss zu setzen, unabhängig von seinen eigenen Präferenzen. Die Methode verführt also zu taktischen Überlegungen, wenn auch nicht unbedingt zum Betrug. Borda selber war sich dieser Gefahr bewusst und betonte, dass seine Methode nur für ehrliche Wähler gedacht sei.

Das Verfahren von Condorcet

Condorcet hatte seinerseits ein Verfahren entwickelt, das sein Paradox eliminierte, wenngleich ihm in den Einzelheiten Fehler unterliefen. Heute scheint sein Vorschlag in Vergessenheit geraten zu sein.

Das Verfahren geht von der idealistischen Vorstellung aus, es gebe eine „wahre" Rangfolge. Einer der Kandidaten sei objektiv der Beste, ein anderer der Zweitbeste und so weiter. Es gelte nur noch, diese Wahrheit zu finden, und der Wahlvorgang sei eine Art physikalischer Messprozess oder eine Meinungsumfrage: zwar fehlerbehaftet, aber durch die Zusammenfassung vieler Einzelmessungen letztlich doch erfolgreich.

Condorcet postuliert ehrliche Wähler, die mit einer Wahrscheinlichkeit von $p > 0{,}5$ die Qualitäten jedes Kandidatenpaares richtig beurteilen. Weiter sollen all diese Urteile unabhängig voneinander gefällt werden. Das Ergebnis ist eine Präferenztabelle paarweiser Vergleiche wie etwa im Kasten auf Seite 78. Ganz im Sinne der Statistik ist dann die Bundesrangliste nach Condorcet diejenige Präferenzliste, die am wahrscheinlichsten ist unter der Voraussetzung, dass die gegebenen „Messwerte" (Wahlergebnisse) vorliegen.

Das ist relativ leicht auszurechnen. Die Condorcet-Punktzahl einer Rangliste, etwa $A > B > C > D$, ist gleich der Anzahl der Wählerstimmen, die A vor B gesetzt haben, plus die derjenigen mit A vor C, A vor D, B vor C, B vor D und C vor D. Die wahrscheinlichste Rangliste ist diejenige mit der höchsten Condorcet-Punktzahl.

Im Beispiel von Seite 78 ist das die Rangfolge $A > B > C > D > F > E$, während das Borda-Verfahren die völlig andere Rangordnung $C > A > B > D > E > F$ liefert. Man überzeugt sich leicht, dass ein Condorcet-Sieger auch in der Condorcet-Rangfolge zuoberst wäre, in unserem Beispiel Kandidat A, der in allen Feldern seiner Zeile ein Ergebnis über 50 Prozent erzielt.

Natürlich sind nicht alle Bedingungen von Arrow erfüllt; so ist die dritte verletzt, da zusätzliche Kandidaturen die Reihenfolge ändern können. Im besprochenen Beispiel ergibt der direkte Vergleich zwischen D und E eine Mehrheit von 59 Prozent zu Gunsten von E, während in der Condorcet-Rangfolge D vor E kommt. Immerhin ist Arrows dritte Bedingung im folgenden eingeschränkten Sinn erfüllt: Kandidaten, die in der Rangliste direkt hintereinander erscheinen, wie hier D, F und E, werden auch dann in dieser Reihenfolge bleiben, wenn alle anderen Kandidaten nicht berücksichtigt werden.

Im Beispiel schließen sich die Präferenzen für D, E und F zum Kreis: $D > F > E > D$. Das Verfahren von Condorcet bricht diesen Kreis auf, indem es die kleinste der drei Punktzahlen (59 Prozent für E über D) zu Gunsten der anderen (66 für F über E und 64 für D über F) vernachlässigt.

Ist dieser Vorschlag nun in der Praxis anwendbar oder nur eine schöne mathematische Konstruktion? Für die Wahl eines Präsidenten oder Parlaments ist er leider zu kompliziert, zu undurchsichtig und daher möglicherweise Misstrauen erregend. Einfachheit und Transparenz sind fundamentale Elemente eines Wahlmodus.

Strategien des Wählers

Wenn, wie beim zweiten Wahlgang der französischen Präsidentschaftswahlen, nur zwei Bewerber gegeneinander antreten, dann muss der Wähler nicht lange nachdenken: Er stimmt für den von ihm bevorzugten Kandidaten, und die Mehrheitsregel funktioniert in diesem Fall einwandfrei.

Literaturhinweis

Symmetry, Voting, and Social Choice. Von Donald G. Saari in: The Mathematical Intelligencer, Bd. 10, Heft 3, 1988, S. 32.

Bei mehreren Kandidaten ändert sich die Strategie je nach Wähler und Wahlmodus. In Frankreich, beim dort beliebten System mit zwei Wahlgängen, heißt es oft: „Im ersten Wahlgang nach dem Herzen, im zweiten nach dem Geldbeutel", oder: „Im ersten wird ausgeschieden, im zweiten gewählt", oder auch umgekehrt: „Im ersten wird gewählt, im zweiten ausgeschieden". Hinter jedem dieser Sprüche steckt eine Strategie, ein Ratschlag an den Wähler, die Wahl in seinem Sinne zu beeinflussen. Hätten die Wähler sich irgendwie anders verhalten, wenn sie Mitterrands Sieg über Chirac im zweiten Wahlgang von 1988 geahnt hätten? Soll man „zweckmäßig" wählen oder, umgekehrt, seine Ideologie, seine Überzeugung, seinen Widerstand ausdrücken? Soll man, wenn der bevorzugte Kandidat ▶



Der Philosoph, Mathematiker und Politiker Jean-Antoine-Nicolas Caritet, Marquis de Condorcet, wurde im September 1743 in Ribemont geboren und starb im März 1794 im Gefängnis von Bourg-la-Reine.

POUR LA SCIENCE



Ein französisches Wahllokal 1888: Die Atmosphäre ist feierlich, und man nimmt seinen Hut bei der Stimmabgabe ab. Die Frau darf ihren Mann nur begleiten, da sie nicht wahlberechtigt ist.

A die besten Aussichten auf das Erreichen des zweiten Wahlganges besitzt, für einen schwachen Gegner *B* stimmen, damit ihm der starke *C* im zweiten Wahlgang nicht mehr gefährlich werden kann? Politisches Taktieren ist heikel!

Diese Schwierigkeit kommt mathematisch in dem mathematischen Satz von Gibbard und Satterthwaite zum Ausdruck: Für mehr als zwei Kandidaten gibt es keinen Wahlmodus, bei dem das optimale Verhalten eines Wählers nicht durch strategische Überlegungen bestimmt wäre – abgesehen von Arrows Diktatur. Um seinen Kandidaten optimal zu helfen, muss der rational denkende Wähler manchmal unehrlich handeln, also für einen unbeliebten Gegner stimmen oder eine Rangliste aufstellen, die seinen Präferenzen widerspricht.

Die Wahl durch Zustimmung

Ein kürzlich vorgeschlagenes Verfahren ist einfach, leicht verständlich und könnte mindestens zwei schwere Ärgernisse aus dem Weg räumen: den Zwang zur strategischen Unehrlichkeit und die Möglichkeit, dass ein Condorcet-Sieger die Wahl nicht gewinnt. Die „Wahl durch Zustimmung" (*approval voting*) erfordert einen einzigen Wahlgang. Dabei hat der Wähler die Möglichkeit, für nur einen, für mehrere oder gar für alle Kandidaten zu stimmen, allerdings nur einmal für jeden. Der Kandidat mit den meisten erhaltenen Stimmen ist dann gewählt.

Mit diesem System wäre bei der Senatorenwahl von 1970 wahrscheinlich Goodell, der Condorcet-Sieger, gewählt worden. Unter der Annahme, dass die Hälfte der Wähler nur ihre erste Wahl, die andere Hälfte ihre erste und zweite angekreuzt hätten, wäre der Stimmanteil für Buckley $39+10/2=44$ gewesen, für Goodell $39/2+37/2+10+14=62$ und für Ottinger $37+14/2=44$.

Das Verfahren von Borda

Der üble Einfluss der Spaßkandidaten

	A	B	C	D	E	F	Borda-Pte.
A	–	51	54	58	60	62	285
B	49	–	68	56	52	58	283
C	46	32	–	70	66	75	289
D	42	44	30	–	41	64	221
E	40	48	34	59	–	34	215
F	38	42	25	36	66	–	207

Nehmen wir an, in einer Wahl zwischen den sechs Kandidaten *A* bis *F* habe sich diese Präferenztabelle ergeben. Sie ist zu lesen wie die übrigen Tabellen; beispielsweise würden in einer direkten Konfrontation *A* gegen *C* 54 Prozent der Wähler für *A* und 46 für *C* stimmen. Die Pfeile im rechten Bild kennzeichnen die Ergebnisse von Zweikämpfen: *A* würde gegen *B* gewinnen, *B* gegen *C* und so fort. Nach dem Verfahren von Borda ist *C* der Sieger unter den sechs Kandidaten; wenn aber die ohnehin aussichtslosen Kandidaten *D*, *E* und *F* nicht zur Wahl antreten, ist es *B*. Störkandidaten können also das Ergebnis beeinflussen.

Bei drei Kandidaten kann man zeigen, dass die Wahl durch Zustimmung das einzige Verfahren innerhalb einer gewissen Klasse ist, das die Wähler zur Ehrlichkeit zwingt: Man muss immer für seine erste Wahl stimmen, nie für seine letzte. Ob man seine zweite Wahl erwähnt, hängt von strategischen Überlegungen ab, was aber der Ehrlichkeit keinen Abbruch tut. Sind jedoch vier Kandidaten vorhanden, die von einem bestimmten Wähler in der Reihenfolge $A > B > C > D$ beurteilt werden, und lassen die Umfragen ungefähr gleiche Ergebnisse für *A* und *B* einerseits, für *C* und *D* andererseits erwarten, so könnte unser Wähler zur Unehrlichkeit neigen und nur für *A* und *C* stimmen.

Trotzdem ist dieses Verfahren vernünftig und anwendbar. Realistische Annahmen über die Möglichkeit knapper Entscheidungen lassen erwarten, dass sich die Wähler ehrlich verhalten würden. Warum sollte jemand für *A* und nicht für *B* stimmen, wenn er *B* für besser hält? Die optimale Strategie eines ehrlichen Wählers wäre, für jeden seiner Meinung nach überdurchschnittlichen Kandidaten zu stimmen.

Die üblichen Wahlverfahren, bei welchen nicht alle Präferenzen ausgedrückt werden, lassen einen Condorcet-Sieger nicht immer erkennen. Bei einer Wahl durch Zustimmung ist diese Gefahr viel kleiner, sodass dieser Modus eine interessante Alternative zum Verfahren mit zwei Wahlgängen darstellt. Man kann mit ihm sowohl nach dem Herzen als auch nach dem Geldbeutel wählen, man kann eliminieren und auswählen, zweckmäßig oder idealistisch stimmen, unterstützen und ablehnen. Deshalb wird er mehr und mehr angewendet: bei Wahlen an Hochschulen oder bei solchen für die Präsidentschaft wissenschaftlicher Gesellschaften (einige davon mit über 400000 Mitgliedern), bei einem Referendum im Staate Oregon, wo fünf Vorschläge zur Auswahl standen, und in Russland, wo die Wähler aufgefordert werden, Namen auf dem Wahlzettel zu streichen.

Alle Paradoxien in einem einzigen Beispiel

Das Wahlverfahren bestimmt, wer gewinnt

Nehmen wir an, dass eine fiktive Wählerschaft die fünf Kandidaten *A* bis *E* gemäß folgender Tabelle in eine Rangfolge bringt. Beispielsweise geben (zweite Spalte) 16 Prozent die Präferenz $B > D > C > E > A$ an.

Prozent der Wähler	33	16	3	8	18	22
Reihenfolge in der Beliebtheitsskala	A B C D E	B D C E A	C D B A E	C E B D A	D E C B A	E C B D A

Daraus ergibt sich die folgende Tabelle für die direkten Vergleiche samt zugehörigem Präferenzgraph:

	A	B	C	D	E
A	–	33	33	33	36
B	67	–	49	79	52
C	67	51	–	66	60
D	67	21	34	–	70
E	64	48	40	30	–

C → B → D → E → A

Jedes Feld der Tabelle enthält die Stimmen des Zeilen- gegen den Spaltenkandidaten. So besiegt *C* im direkten Vergleich *D* mit 66 Prozent der Stimmen. In diesem Beispiel gibt es für jeden Bewerber ein Verfahren, das ihn gewinnen lässt.

A gewinnt in einer Mehrheitswahl: Jeder Wähler stimmt für (höchstens) einen Kandidaten, und *A* bekommt 33 Prozent.

B gewinnt nach dem Verfahren von Borda: Jeder Wähler gibt seinem bevorzugten Kandidaten vier Punkte, dem zweiten drei, dem dritten zwei und dem vierten einen. *B* erhält $(3\times33)+(4\times16)+(2\times3)+(2\times8)+(1\times18)+(2\times22)=247$ Borda-Punkte. Die Punktzahlen der anderen Kandidaten: 135 für *A*, 244 für *C*, 192 für *D*, 182 für *E*.

Kandidat *C* ist der Condorcet-Sieger. Er gewinnt gegen jeden anderen, wie man aus der Tabelle der direkten Vergleiche ablesen kann: In jedem Feld der Zeile *C* steht mehr als 50 Prozent.

D gewinnt in einer Vorzugswahl. Da niemand 50 Prozent der ersten Plätze erreicht, wird der Kandidat mit den wenigsten, also *C*, gestrichen. Die neuen Zahlen sind 33 Prozent für *A*, 16 Prozent für *B*, 21 Prozent für *D* und 30 Prozent für *E*. Daraufhin scheidet *B* aus, und die neue Auswertung ergibt 33 Prozent für *A*, 37 Prozent für *D* und 30 Prozent für *E*. Nun wird *E* gestrichen, und *D* gewinnt mit 67 Prozent der Stimmen gegen *A*.

E gewinnt in einer Wahl nach französischem System mit zwei Wahlgängen. Nachdem niemand im ersten Wahlgang die absolute Mehrheit erreicht, bleiben *A* und *E* als bestplatzierte Kandidaten im Rennen, und *E* gewinnt den direkten Vergleich deutlich mit 64 Prozent der Stimmen.

Ein konstruiertes Schulbeispiel? Gewiss. Aber es zeigt die entscheidende Rolle des Wahlverfahrens.

Was tun?

Welche Schlüsse kann die Nachwelt aus diesen theoretischen Ausführungen ziehen?

Die Aufgabe der Mathematik besteht darin, alle erwünschten Eigenschaften eines Wahlverfahrens aufzulisten und die Grenzen des Machbaren aufzuzeigen. Aber nach einem sprichwörtlich gewordenen Wort von François de Fénelon (1651–1715) „genügt es nicht, die Wahrheit zu zeigen, man muss sie auch liebenswert darstellen“.

Wir brauchen einfache und direkte Wahlverfahren. Die Wahl durch Zustimmung ist eine Möglichkeit, die bereits mit Erfolg angewendet wurde, wenn auch nicht aus rein mathematischen Gründen. Es gibt keine endgültige mathematische Lösung, und es wird nie eine geben.

Man muss also experimentieren. Damit wird man das Verhalten der Wähler bei den verschiedenen Verfahren besser verstehen. Die Wahl durch Zustimmung wurde beim ersten Wahlgang der französischen Präsidentschaftswahlen am 21. April 2002 in einem Pariser Vorort sowie in einem Dorf südöstlich der Hauptstadt getestet. Die Wähler wurden an beiden Orten gebeten, sowohl den offiziellen Wahlzettel auszufüllen als auch an einer Wahl durch Zustimmung teilzunehmen. ■



Michel Balinski *ist seit 1989 Professor für Wirtschaftswissenschaften an der École Polytechnique in Paris. Er befasst sich in seiner Forschungsarbeit mit diskreter Optimierung und vor allem mit Wahlsystemen.*



Wer kommt ins Parlament?

Für das unerreichbare Ideal der proportionalen Sitzverteilung gibt es verschiedene Näherungen. Wieder kann keine von ihnen einige vernünftige Forderungen zugleich erfüllen.

Von Henri Carnal und Hans Riedwyl

Auf den ersten Blick ist es eine einfache Dreisatzaufgabe: Nach der Wahl sollen für jede Partei so viele Abgeordnete ins Parlament einziehen, wie ihrem Anteil an der Gesamtstimmenzahl entspricht. Wenn also P die Gesamtzahl der abgegebenen Stimmen ist und p_i die Anzahl der Stimmen für die i-te Partei, dann soll sie $q_i = (p_i / P)S$ Parlamentssitze erhalten, wobei S die Gesamtzahl der zu vergebenden Sitze ist. Nur ist die so berechnete „S-Quote" q_i im Allgemeinen keine ganze Zahl. Da es keine halben Abgeordneten gibt, muss man nach einer „möglichst gerechten" Annäherung an das Ideal der proportionalen Aufteilung suchen.

Im Beispiel: Es seien 9 Millionen Stimmen abgegeben worden, davon 4,3 Millionen an Partei *A*, 3,3 Millionen an Partei *B* und 1,4 Millionen an *C*. Zu vergeben sind 9 Sitze, also einer für jede Million Stimmen.

Ein Verfahren besteht darin, jeder Partei zunächst den ganzzahligen Anteil ihrer Quote zuzuweisen: vier für *A*, drei für *B* und einen für *C*, denn diese Mandate stehen jeder Partei unstreitig zu. Der „Rest", das heißt der nicht-ganzzahlige Anteil der Quote, entspricht einer gewissen Anzahl an Stimmen, die zunächst nicht repräsentiert sind, also der jeweiligen Partei verloren gehen. Die nun noch zu vergebenden Sitze werden der Reihe nach an die Partei mit dem größten, dem zweitgrößten … Rest vergeben. Im Beispiel geht der einzige noch freie Sitz an Partei *C*, denn die hatte mit 0,4 Millionen unberücksichtigten Stimmen den größten Schaden durch die Abrundung erlitten. Dafür wird sie jetzt durch das zusätzliche Mandat mehr als entschädigt.

Das ist das Verfahren nach Hare/Niemeyer, auch Verfahren der größten Reste genannt. Es wird bei der deutschen Bundestagswahl angewandt (Kasten rechts).

Grundsätzlich anderer Art ist das Verfahren der größten Quotienten, das nach dem Belgier Victor d'Hondt benannt ist: Man dividiert die Stimmenzahlen nacheinander durch die ganzen Zahlenfolge 1, 2, 3 und so weiter. Das ergibt für *A* die Zahlen 4,30, 2,15, 1,43, 1,08, 0,86 … (alles in Millionen); für *B*: 3,30, 1,65, 1,10, 0,83 …; und für *C*: 1,40, 0,70, 0,47, 0,35 … Dann werden die Mandate in der Reihenfolge dieser Zahlen vergeben: Den ersten Sitz erhält *A* mit 4,3 Millionen, den zweiten *B* mit 3,3 Millionen Stimmen. Den dritten erhält *A*, weil 2,15 Millionen die nächstgrößte Zahl der Liste ist.

Verfahren von d'Hondt: Versteigerung von Mandaten

Das lässt sich wie folgt begründen: Wenn das Verfahren an dieser Stelle abgebrochen würde (etwa weil nur drei Mandate zu vergeben wären), dann würden auf jeden *A*-Sitz 2,15 Millionen Stimmen entfallen. Würde der letzte Sitz statt an *A* an *B* oder *C* vergeben, dann wäre ein *B*-Sitz schon für 1,65 Millionen Stimmen zu haben und ein *C*-Sitz für nur 1,4 Millionen. Mit dem Verfahren der größten Quotienten „versteigern" wir also die begehrten Güter, sprich Parlamentssitze, fortlaufend an die jeweils „meistbietende" Partei. Das führt dazu, dass am Ende auf jeden Sitz annähernd gleich viele Stimmen entfallen, einerlei welcher Partei er zugewiesen wurde. Im Beispiel erhält *A* fünf Sitze, *B* drei und *C* einen.

Zum selben Ergebnis kommt man mit einer äquivalenten Berechnungsart, die sich vor allem mit den heute verfügbaren Tabellenkalkulationsprogrammen bequem realisieren lässt: Man dividiert alle Stimmenzahlen durch die Anzahl der Stimmen, die theoretisch pro Sitz erforderlich wäre, im Beispiel also $x = 1\,000\,000$, rundet – ebenso wie beim Verfahren der größten Reste – die Ergebnisse auf ganze Zahlen ab und weist den Parteien vorläufig die entsprechende Anzahl an Mandaten zu. Im Allgemeinen werden dadurch nicht alle Sitze besetzt. Man wiederholt nun die Rechnung mit immer kleineren Werten für x: Wenn zum „Preis" von einer Million nicht alle Sitze weggehen, senkt man langsam den Preis, bis die Gesamtzahl der so zugewiesenen Sitze den vorgegebenen Wert S erreicht. Im Beispiel ist das bei einem Preis von 0,85 Millionen Stimmen pro Sitz der Fall.

Eduard Hagenbach-Bischoff hat eine weitere Berechnungsart mit demselben Ergebnis angegeben: In einem ersten Schritt teilt man jeder Partei die abgerundete Quote bezüglich der Mandatzahl $S+1$ zu. Im obigen Beispiel mit $S+1=10$ ergibt das die Quoten 4,778 für *A*, 3,667 für *B* und 1,556 für *C*, womit zunächst *A* vier Mandate, *B* drei und *C* eines erhält. Da damit noch nicht alle Sitze vergeben sind, werden die Stimmenzahlen jeder Partei durch die um eins vergrößerte Anzahl der ihr bereits zugeteilten Mandate dividiert und das nächste Mandat der Partei mit dem höchsten Quotienten gegeben. In unserem Fall ergibt sich für *A* $4{,}3/5=0{,}86$, für *B* $3{,}3/4=0{,}825$ und für *C* $1{,}4/2=0{,}7$. Damit geht das neunte Mandat an *A*. Wenn jetzt immer noch Sitze frei wären, müsste das Verfahren mit aktualisierten Werten für die bereits zugeteilten Mandate wiederholt werden.

Beide Systeme erscheinen durchaus plausibel, führen aber in der Regel zu unterschiedlichen Ergebnissen. Parlamentarier, die zwischen ihnen zu entscheiden haben, lassen sich meistens nur ausrechnen, wie viele Sitze ihnen das jeweilige System mit den Ergebnissen der letzten Wahlen gebracht hätte, und vergessen dabei, dass das System auch das Verhalten der Wähler beeinflussen kann. Der richtige Weg ist vielmehr, Verfahren unabhängig von früheren Situationen an ihren Eigenschaften zu messen.

Die Methode der größten Reste erfüllt die so genannte **Quotenbedingung**,

das heißt, die Zahl der Mandate ist für alle Parteien mindestens der auf- oder höchstens der abgerundeten S-Quote gleich. Bei der Methode der größten Quotienten kann eine Partei zwar mehr als die aufgerundete S-Quote, aber nie weniger als die abgerundete S-Quote erhalten. So hätte 1998 die CDU mit 199 Sitzen einen mehr als die aufgerundete S-Quote von 198 erhalten. Andererseits sollen alle Wähler mit der Stimme, die sie abgeben, den gleichen Einfluss auf das Wahlergebnis haben. Das wäre dann am besten erfüllt, wenn hinter jedem Mandat dieselbe Zahl von Wählern stehen würde – was man nach der Verteilung in der Regel nicht erwarten kann. Dem demokratischen Prinzip „Ein Wähler, eine Stimme“ kommt man mit der so genannten Minimax-Bedingung am nächsten: Das Minimum der Stimmen pro Mandat soll maximal werden. Und das ist für die Methode der größten Quotienten stets erfüllt. Für den deutschen Bundestag 1998 wäre das Minimum mit 70376 Stimmen pro Sitz (bei der CDU) größer gewesen als mit nur 69874 (bei der PDS) für die Restemethode.

Von einem guten System erwarten wir weiter, dass keine Partei Mandate verliert, wenn das Parlament vergrößert wird. Das ist die so genannte **Hausmonotonie**. Die Quotientenmethode erfüllt diese Eigenschaft, denn die Sitze werden ja nacheinander zugeteilt, sodass keine Partei einen einmal erhaltenen Sitz verlieren kann. Für die Restemethode trifft das jedoch nicht zu. Dies wurde in den USA entdeckt, als nach der Volkszählung von 1880 das US-Repräsentantenhaus erweitert werden sollte. Mit der damals verwendeten Methode der größten Reste wäre beim Übergang von 299 auf 300 Sitze der Anteil von Alabama von acht auf sieben Sitze zurückgefallen, wonach das Problem den Namen Alabama-Paradoxon erhielt.

Was wäre, wenn der Bundestag einen Sitz mehr hätte?

Im anfangs beschriebenen Beispiel würden bei einer Sitzzahl von 10 die S-Quoten für *A* 4,778, für *B* 3,667 und für *C* 1,556 betragen. Demnach gehen die Restsitze an die ersten beiden Parteien, und die Verteilung ist 5, 4, 1. Partei *C* bekommt also nur eines von zehn Mandaten statt zwei von neun.

Dieses Paradoxon kann man auch für den Bundestag von 1998 nachweisen. Wären nämlich 657 statt 656 Mandate zu vergeben gewesen, hätte die PDS ihren 36. Sitz wieder verloren, während SPD und FDP je einen zugelegt hätten. Das zeigt deutlich, dass der letzte PDS-Sitz auf wackligen Füßen stand.

Eine weitere wichtige Eigenschaft, die wir von einem guten System erwarten, ist die **Mehrheitsbedingung**: Eine Partei, die die Mehrheit der Stimmen auf sich vereinigt, soll auch die Mehrheit der Sitze erhalten.

Partei i	Stimmenanteil	S-Quote	Sitze s_i
A	52	2,6	2
B	33	1,65	1 + 1
C	15	0,75	0 + 1

Es seien 5 Sitze unter drei Parteien mit *A*: 52, *B*: 33 und *C*: 15 Prozent der Stimmen zu verteilen. Nach dem Verfahren der größten Reste gehen je zwei Sitze an *A* und *B* und einer an *C*. Die kleineren Parteien erhalten also zusammen eine Mehrheit, obwohl *A* die absolute Mehrheit der Stimmen erzielt hat! Das deutsche Wahlrecht (1. Abschnitt, Paragraf 6) würde diese Anomalie korrigieren, nicht aber bei Stimmanteilen von 49, 33, 15 (sowie 3 Prozent für „Sonstige“). Wenn dagegen *B* und *C* als eine einzige Partei mit 48 Prozent der Stimmen aufträten, würden sie ihre Mehrheit verlieren! Die Quotientenmethode erfüllt im Gegensatz zur Restemethode stets die Mehrheitsbedingung. In dem angeführten Beispiel ergibt sich die Sitzverteilung 3, 2, 0.

Allgemein ist es unter der Restemethode für zwei Parteien von Nachteil, wenn sie in Form einer so genannten Listenverbindung als eine einzige Partei auftreten und erst in einem zweiten Schritt die errungenen Mandate unter sich aufteilen. Dagegen sind Listenverbindungen bei der Quotientenmethode sinnvoll und empfehlenswert. Nehmen wir an, für die Verteilung von fünf Man- ▶

Berechnung der Sitzverteilung nach verschiedenen Verfahren

Der Bundestag nach der Wahl von 1998 – tatsächlich und fiktiv

Nach der Wahl wurde die Sitzverteilung nach dem Verfahren der größten Reste von Hare/Niemeyer bestimmt. Die vier Sitze, die nicht bereits durch die abgerundete Quote vergeben wurden, gingen in der Reihenfolge der größten Reste an CSU, CDU, Grüne und PDS („+ 1“ in der Spalte „Sitzzuteilung“). Die eckige Klammer („Gauß-Klammer“) bedeutet Abrunden auf die nächste ganze Zahl; [285,27] = 285. Bei diesem Verfahren ist die PDS diejenige, die für einen Sitz den niedrigsten Preis zahlt: nur 69874 Stimmen.

Mit der Quotientenmethode nach d’Hondt ergibt sich die korrekte Sitzzahl bei einem konstanten Divisor $x = 70\,350$ (der Ausgangswert ist $x = 70\,744$). Bei Anwendung dieses Verfahrens hätten, verglichen mit dem tatsächlich praktizierten Verfahren, Grüne und PDS je einen Sitz an SPD und CDU abgeben müssen. Die letzte Spalte zeigt, dass der Mindestpreis pro Sitz diesmal höher liegt, nämlich bei 70376 Stimmen. Es wäre die CDU gewesen, die diesen Preis erzielt hätte.

		Verfahren der größten Reste (Hare/Niemeyer)					Verfahren der größten Quotienten (d’Hondt)			
Partei i	Stimmen p_i	S-Quote $q_i = S \cdot p_i / P$	gerundet $[q_i]$	Rest $q_i - [q_i]$	Sitzzuteilung s_i	Stimmen pro Sitz p_i / s_i	Konstante x	Quotient p_i / x	Sitzzuteilung $s_i = [p_i / x]$	Stimmen pro Sitz p_i / s_i
SPD	20181269	285,27	285	0,27	285	70811	70350	286,87	286	70564
CDU	14004908	197,96	197	0,96	197 + 1	70732	70350	199,07	199	**70376**
CSU	3324480	46,99	46	0,99	46 + 1	70734	70350	47,26	47	70734
Grüne	3301624	46,67	46	0,67	46 + 1	70247	70350	46,93	46	71774
FDP	3080955	43,55	43	0,55	43	71650	70350	43,79	43	71650
PDS	2515454	35,56	35	0,56	35 + 1	**69874**	70350	35,76	35	71870
Total	**$P = 46\,408\,690$**	**656,00**	**652**	**4,00**	**$S = 656$**				**$S = 656$**	



daten auf die Parteien mit den Stimmenzahlen A: 700, B: 150 und C: 145 hätten sich B und C zusammengetan. Die Restemethode würde der Partei A vier Mandate und der Verbindung von B und C eines zuteilen. Ohne Listenverbindung würden B und C auf Anhieb je ein Mandat erhalten. Anders die Methode von d'Hondt: Bei 250 statt 145 Stimmen für C würde A drei Mandate und die Verbindung von B und C zwei Mandate erhalten. Ohne Listenverbindung bekäme A vier Sitze, C einen, und B ginge leer aus.

Bei den Bundestagswahlen schließen sich die Landeslisten jeder Partei regelmäßig zu einer Listenverbindung, der so genannten Bundesliste, zusammen. Wäre das 1998 nicht der Fall gewesen, so hätte die FDP auf Kosten der CDU und der Grünen zwei Mandate mehr erhalten.

Eine weitere vernünftige Forderung ist die nach **Stimmenmonotonie**: Wenn der Stimmenanteil einer Partei ansteigt, sollte ihr das nicht zum Nachteil ausschlagen, und umgekehrt. Die Restemethode erfüllt auch diese Forderung nicht, wie das folgende Beispiel zeigt:

Partei	Stimmen	S-Quote	Sitze
A	26 000	6,60	7
B	5 800	1,45	1
C	8 200	2,10	2
Total	P= 40 000	10,00	10

Verliert nun B 200 Stimmen, während C 1200 gewinnt, so gewinnt sie trotzdem einen Sitz zu Lasten von A!

Partei	Stimmen	S-Quote	Sitze
A	26 000	6,34	6
B	5 600	1,37	2
C	9 400	2,29	2
Total	P= 41 000	10,00	10

Für die Besetzung seiner Ausschüsse und für die Vergabe der Ausschussvorsitze im Verhältnis der Fraktionsstärken wendet der Deutsche Bundestag ein drittes Verfahren an, benannt nach André Sainte-Laguë. Im Prinzip gleicht es dem Quotientenverfahren nach d'Hondt; nur werden diesmal die Stimmenzahlen der Parteien nicht durch die Zahlen 1, 2, 3, … dividiert, sondern durch die ungeraden Zahlen 1, 3, 5, … Man kommt zum gleichen Ergebnis, wenn man wie bei der oben beschriebenen alternativen Berechnungsweise für das Quotientenverfahren einen passenden Divisor x verwendet, aber bei der Berechnung der Sitzzahlen das Ergebnis nicht abrundet, sondern auf die nächste ganze Zahl rundet. Für die im Kasten aufgeführte Bundestagswahl hätte der Divisor den Wert $x = 70850$. In diesem speziellen Fall ergibt sich dieselbe Sitzverteilung wie bei der Restemethode.

Sainte-Laguë: die Minimierung des Rundungsfehlers

Das Verfahren von Sainte-Laguë ist im Gegensatz zur Restemethode hausmonoton, erfüllt jedoch die Mehrheitsbedingung nicht, wie folgendes Beispiel zeigt.

Partei	Stimmen	Sitze
A	52	2
B	33	2
C	15	1
Total	100	5

Was zeichnet die Methode aus? Dem Ideal „möglichst gleiche Stimmenzahl pro Sitz" entspräche es, wenn dieser Wert p_i / s_i (die „Vertretungszahl") für alle Parteien dem theoretischen Wert P/S so nahe käme wie möglich. Es sollen also mehrere Werte, die p_i / s_i, möglichst wenig von einem anderen Wert abweichen. Das ist im Prinzip dieselbe Aufgabe wie einen Schätzwert zu finden, der möglichst gut zu einer Reihe fehlerbehafteter Messwerte passt. Seit Gauß verwendet man dafür die „Methode der kleinsten Quadrate": Das Ergebnis gilt als optimal, wenn die Summe der Quadrate der Abweichungen so klein ist wie nur möglich. In unserem Fall multipliziert man jedes Quadrat mit der Anzahl der Sitze, die es betrifft, minimiert also eine gewichtete Summe:

$$\sum_{i=1}^{n} s_i \left(\frac{s_i}{p_i} - \frac{S}{P} \right)^2$$

Das Verfahren von Sainte-Laguë ist nun genau dasjenige, das die so definierte Quadratsumme minimiert, und scheint daher auf den ersten Blick sehr plausibel. Doch gerade die letzten Jahrzehnte statistischer Forschung haben gezeigt, dass die Methode der kleinsten Quadrate kein Allheilmittel ist.

Man könnte statt dessen verlangen, dass die Unterschiede zwischen den Vertretungsziffern p_i / s_i möglichst klein bleiben. Das läuft darauf hinaus, das Maximum der Beträge der Differenzen $|p_i/s_i - p_j/s_j|$ zu minimieren. Aus diesem Prinzip ergibt sich die Quotientenmethode von Huntington. Sie wird noch heute in den USA für die Zuteilung der Mandate des Repräsentantenhauses an die Bundesstaaten angewendet. Ihre Divisorenfolge ist

$$0, \quad \sqrt{1 \times 2} = 1,41,$$
$$\sqrt{2 \times 3} = 2,45, \quad \sqrt{3 \times 4} = 3,46, \ \ldots$$

Das Ergebnis einer Division durch Null wird als unendlich interpretiert mit der Folge, dass jeder Staat mindestens ein Mandat erhält. Auch dieses Verfahren führt zu Paradoxien.

Wie werden die Mandate auf Teilregionen verteilt?

Bisher haben wir nur von den Parteien und ihren Sitzansprüchen gesprochen. Ein verwandtes Problem ist die Verteilung der Mandate auf die Länder (Bundesstaaten, Provinzen oder Kantone). Auf jedes Bundesland sollen so viele Sitze im Bundestag entfallen wie seiner Einwohnerzahl entspricht.

Für die Bundestagswahlen 2002 ist die Anzahl der Wahlkreise von bisher 328 auf 299 reduziert worden. Der nächste Bundestag wird also noch 598 Mitglieder zählen (plus möglicherweise Überhangmandate). Die Tabelle auf Seite 84 zeigt die durch Gesetz vorgenommene Zuordnung auf die Länder nach den Bevölkerungszahlen vom 31. Dezember 1999. Diese entspricht sowohl der Methode von Hare/Niemeyer als auch der von Sainte-Laguë. Würde man die Zahl der Wahlkreise mit der Quotientenmethode nach d'Hondt auf die Länder verteilen, so kämen auf einen Wahlkreis nie weniger als 245 149 Einwohner (Bayern) im Gegensatz zu der gültigen Verteilung, wo das minimale Vertretungsverhältnis 238 696 beträgt (Schleswig-Holstein). Drei Länder würden auf Kosten anderer Länder einen Wahlkreis hinzugewinnen.

Dank der Größe der Bundesländer enthält jedes mindestens zwei Wahlkreise. In Frankreich, in den USA und in der Schweiz muss man noch dafür sorgen, dass jeder Landesteil mindestens ein ▶

Literaturhinweise

Fair Representation. Von M. L. Balinski and H. P. Young. Brookings Institution Press, Washington 2001.

Mandatszuteilungen bei Verhältniswahlen: Erfolgswertgleichheit der Wählerstimmen. Von Friedrich Pukelsheim in: Allgemeines Statistisches Archiv, Bd. 84. S. 447 (2000).

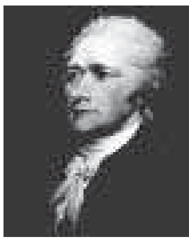
What Is Proportionality Anyhow? Von Hans Riedwyl und Jürg Steiner in: Comparative Politics, Bd. 27, S. 357 (1995).

How Proportional is Proportional Representation? Von D. R. Woodall in: The Mathematical Intelligencer, Bd. 8, S. 36 (1986).

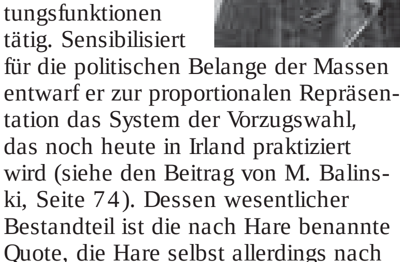
Weblinks finden Sie bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis".*

Von Friedrich Pukelsheim, Professor für Mathematik an der Universität Augsburg

Die Methode der größten Reste



Alexander Hamilton (1755–1804), einer der Väter der amerikanischen Verfassung, bemerkte, dass die Sitzzuteilung nach dem Vorschlag des Präsidenten Jefferson (siehe unten) zum Nachteil von Hamiltons „Federalists" von dem abwich, was aus einer Dreisatzrechnung als Idealanspruch geltend gemacht werden konnte. Seine Alternativzuteilung gemäß der Restemethode wurde zwar im Repräsentantenhaus mehrheitlich gebilligt, aber dann vom ersten je ausgesprochenen Veto eines amerikanischen Präsidenten doch noch gekippt.



Thomas Hare (1806–1891), Rechtsanwalt in England, war im viktorianischen Wohlfahrtssystem in diversen Leitungsfunktionen tätig. Sensibilisiert für die politischen Belange der Massen entwarf er zur proportionalen Repräsentation das System der Vorzugswahl, das noch heute in Irland praktiziert wird (siehe den Beitrag von M. Balinski, Seite 74). Dessen wesentlicher Bestandteil ist die nach Hare benannte Quote, die Hare selbst allerdings nach den Gepflogenheiten seiner Zeit abrundete: „Brüche werden nicht gerechnet."



Horst F. Niemeyer (geb. 1931), Professor für Mathematik an der Technischen Hochschule Aachen, reagierte 1970 auf einen Zeitungsartikel, der von Defiziten der Quotientenmethode berichtete, für die eine Alternative aber wohl nur „schwer zu finden sein dürfte". In einem Brief wies er das Bundestagspräsidium auf die Restemethode hin, die im Gegensatz zur Quotientenmethode unverzerrte Sitzzahlen liefert und damit die damaligen Fraktionsstärken bei Ausschussbesetzungen treffender abbildete.

Die Methode der größten Quotienten



Thomas Jefferson (1743–1826), dritter Präsident der USA (1801–1809), schlug die Quotientenmethode vor, als 1791 erstmals die Sitze des US-Repräsentantenhauses den damals 15 Bundesstaaten zuzuteilen waren. Zur Begründung sagte er: „Bruchteilsreste müssen unberücksichtigt bleiben, weil die Verfassung klar besagt, dass es eine Zuteilung mit gemeinsamer Bezugszahl geben soll, während sie über die Behandlung [von Bruchteilsresten] schweigt."



Victor d'Hondt (1841–1901), Professor für Zivil- und Steuerrecht an der Universität Gent (Belgien), setzte sich vehement für ein Verhältniswahlrecht ein, um auch Minderheiten eine Repräsentation zu sichern. Sein „Système pratique et raisonné de représentation proportionnelle" wurde 1882 veröffentlicht. Diverse nationale Gruppierungen, die für ein Verhältniswahlrecht kämpften, übernahmen seine Methode.



Eduard Hagenbach-Bischoff (1833–1910) war Physikprofessor in Basel. Er erstritt eine proportionale Vertretung im Großen Rat: „Wenn bei irgendeiner Liste auf eine bestimmte Zahl von Stimmen *ein* Großrat kommt, so ist bei jeder andern Liste eine gleiche Zahl von Stimmen zu *einem* Großrat berechtigt." Die Begründung führte – für ihn zwangsläufig – zur Methode von d'Hondt; „gegen den Ausdruck Hagenbach'sches System muss ich mich verwahren".

Die Quotientenmethode mit Standardrundung



Daniel Webster (1782–1852) war einer der führenden amerikanischen Staatsmänner seiner Zeit. Als Vorsitzender der Senatskommission, die 1832 die Zuteilung der Sitze des US-Repräsentantenhauses an die Bundesstaaten untersuchte, favorisierte er die Quotientenmethode mit Standardrundung, konnte sich damit aber nicht durchsetzen. Webster nannte sein Verrechnungsverfahren *method of major fractions*; die angelsächsische Literatur spricht von der „Webster-Methode".



André Sainte-Laguë (1882–1950) war Mathematikprofessor am Conservatoire national des arts et métiers in Paris. In seinen Wahlrechtsaufsätzen (1910) betonte er die Vorrangstellung der Wähler: „Damit die Wahlgleichheit so vollständig wie möglich ausfalle, muss jeder einzelne der Wähler den gleichen Einfluss auf das Wahlergebnis haben." Sainte-Laguë war der Erste, der die Quotientenmethode mit Standardrundung aus der Erfolgswertgleichheit der Wählerstimmen heraus rechtfertigte.



Hans Schepers (geb. 1928) wies als Leiter der Gruppe Datenverarbeitung der Wissenschaftlichen Dienste des Deutschen Bundestags 1980 die Parlamentarier auf die Vorzüge einer neuen Berechnungsmethode für die Vergabe von Ausschusssitzen hin. Später ergab sich, dass er das Verfahren von Sainte-Laguë wiederentdeckt hatte. Im Datenhandbuch des Deutschen Bundestags wird die Methode deshalb unter dem Namen Proportionalverfahren (nach Sainte-Laguë/Schepers) geführt.

HAMILTON: AKG BERLIN; HARE: HOAG C., PROPORTIONAL REPRESENTATION, 1926; NIEMEYER: MATHEMATIK LEHREN, HEFT 88, 1998; JEFFERSON: ULLSTEINBILD BERLIN; D'HONDT UND HAGENBACH-BISCHOFF: PORTRÄTSAMMLUNG DER UNIVERSITÄTSBIBLIOTHEK BASEL; WEBSTER: FUNERAL MARCH, DUKE UNIVERSITY RARE BOOKS; SAINTE-LAGUE: FRIEDRICH PUKELSHEIM; SCHEPERS: PRIVAT

Verteilung der Wahlkreise auf die Bundesländer

Die Tücken der proportionalen Repräsentation

Nach den Vorschriften des Wahlkreisneueinteilungsgesetzes wurden die Bundesländer entsprechend ihrer (deutschen) Bevölkerung in Wahlkreise eingeteilt, die dem Ideal von 250 000 Einwohnern pro Wahlkreis unter möglichst weitgehender Einhaltung von Landkreis- und Gemeindegrenzen nahe kommen sollen. Beim Quotientenverfahren hätten Niedersachsen, Nordrhein-Westfalen und Bayern auf Kosten von Schleswig-Holstein, Hamburg und Thüringen je einen Wahlkreis (und damit zwei Bundestagsmandate) mehr erhalten.

		gültige Verteilung		Quotientenmethode d'Hondt		
Bundesland	Bevölkerung 31.12.1999	Wahlkreise	Bevölkerung pro Wahlkreis	Wahlkreise	Bevölkerung pro Wahlkreis	Differenz
Schleswig-Holstein	2 625 654	11	**238 696**	10	262 565	–1
Meckl.-Vorpommern	1 757 671	7	251 096	7	251 096	0
Hamburg	1 442 864	6	240 477	5	288 573	–1
Niedersachsen	7 370 958	29	254 171	30	245 699	1
Bremen	583 902	2	291 951	2	291 951	0
Brandenburg	2 540 028	10	254 003	10	254 003	0
Sachsen-Anhalt	2 604 583	10	260 458	10	260 458	0
Berlin	2 953 105	12	246 092	12	246 092	0
Nordrhein-Westfalen	15 955 175	64	249 300	65	245 464	1
Sachsen	4 354 716	17	256 160	17	256 160	0
Hessen	5 321 459	21	253 403	21	253 403	0
Thüringen	2 407 409	10	240 741	9	267 490	–1
Rheinland-Pfalz	3 719 085	15	247 939	15	247 939	0
Bayern	11 031 710	44	250 721	45	**245 149**	1
Baden-Württemberg	9 170 757	37	247 858	37	247 858	0
Saarland	983 153	4	245 788	4	245 788	0
Total	**74 822 229**	**299**	**250 242**	**299**	**250 242**	**0**

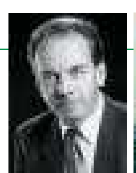
Mandat erhält. Deshalb verwendet man auch Quotientenverfahren mit anderen Divisoren wie das oben zitierte von Huntington. Bei der Verteilung der Nationalratsmandate in der Schweiz auf die Kantone und Halbkantone galt ab 1848, dass jeder Kanton oder Halbkanton auf 20 000 Einwohner ein Mandat erhielt. Mit dem Wachsen der Einwohnerzahl stieg die Anzahl der Nationalräte von 111 auf 198 im Jahre 1922. Danach hat man die Vertretungsziffer auf 22 000 und später nochmals auf 24 000 erhöht. Nach den Wahlen von 1951 wurde dann die obige Restemethode eingeführt und die Zahl der Abgeordneten auf 200 beschränkt.

Auch hier gibt es triftige Argumente für die Quotientenmethode von d'Hondt. Denn die Konstante x kann ja gerade als Vertretungsziffer interpretiert werden, welche die Sitzzahl auf 200 beschränkt. Den Wahlkreisen, die eine kleinere Einwohnerzahl als die Vertretungsziffer haben, hat man eine Vorabzuteilung von einem Mandat garantiert und sie bei der Verteilung der übrigen Mandate ausgeschlossen. Diese Minimalgarantie hätte auch einfach so eingebaut werden können, dass die Summe der Sitzzahlen plus die Anzahl der Wahlkreise ohne Mandat den gewünschten Wert $S = 200$ erreicht. Dem Argument, dass bei sehr unterschiedlichen Größen der Teilregionen die d'Hondt'sche Methode die kleineren benachteiligt, könnte man dadurch entgegenwirken, dass die Teilregionen geografisch zu Verbänden ähnlicher Größe zusammengeschlossen und die Mandate in einem zweistufigen Verfahren zuerst den Verbänden, dann den Teilregionen zugeteilt würden.

Was tun?

Unter den vielen möglichen Methoden gibt es keine, die nach allen Kriterien optimal wäre. Die geschilderten Paradoxien zeigen allerdings, dass Quotientenverfahren deutliche Vorteile gegenüber dem Resteverfahren besitzen.

Der einzige Kritikpunkt wäre, dass das Verfahren von d'Hondt unter Umständen den großen Parteien Vorteile bringt und somit die Quotenbedingung verletzt. Insbesondere können kleine Parteien nur Sitze gewinnen, wenn sie sich zusammentun und als Einheit den Wählern vorstellen. Da parlamentarische Demokratien auf stabile Regierungsmehrheiten angewiesen sind, sollten jedoch Wahlverfahren bevorzugt werden, welche Koalitionen belohnen und nicht bestrafen. Kleine Veränderungen in den Stimmenzahlen der Parteien sollten nicht zu rasch Umverteilungen nach sich ziehen. Unter diesem Aspekt hat die Methode mit den größten Quotienten, die von d'Hondt, deutliche Vorteile. Sie ist einfach zu verstehen und zu rechnen; sie ist stabiler als andere und kommt dem Grundsatz „Ein Wähler, eine Stimme" am stärksten entgegen. ■



Henri Carnal *(links) und* ***Hans Riedwyl*** *sind emeritierte Professoren der Universität Bern, der eine für Wahrscheinlichkeitstheorie und ihre Anwendungen, der andere für angewandte mathematische Statistik.*

Fahrzeugnavigation

Längst verraten Navigationssysteme nicht nur in hochpreisigen Limousinen den günstigsten Weg von A nach B. Die momentane Position berechnen sie während der Fahrt aus einer Vielzahl von Informationen: Aus den Signalen von GPS-Satelliten (*Global Positioning System*) lassen sich die aktuellen Koordinaten auf hundert Meter genau errechnen; die Daten von Tachosensor, bordeigenem Gyroskop und Kompass verbessern die Ortung anhand von Geschwindigkeit und Fahrtrichtung auf wenige Meter. Das Navigationssystem vergleicht die Resultate mit elektronisch gespeicherten Karten. Weil es die Position im Sekundentakt neu bestimmt, erkennt das Gerät eine nahende Kreuzung und bemerkt falsches Abbiegen.

Per Fernbedienung oder Spracherkennung gibt der Fahrer einen Ort, eine Straße oder eine Sehenswürdigkeit ein. Manche Datenbanken enthalten sogar bekannte Restaurants. Die Software sucht alle möglichen Wege zwischen Ausgangs- und Zielpunkt und berechnet die schnellste Strecke. Dabei berücksichtigt sie zusätzliche Informationen etwa über den Straßenzustand oder Geschwindigkeitsbegrenzungen. Ein Display zeigt die Anweisungen an den Fahrer durch Piktogramme und Pfeile an, teurere Geräte haben Monitore, die alle Informationen in Straßenkarten einblenden.

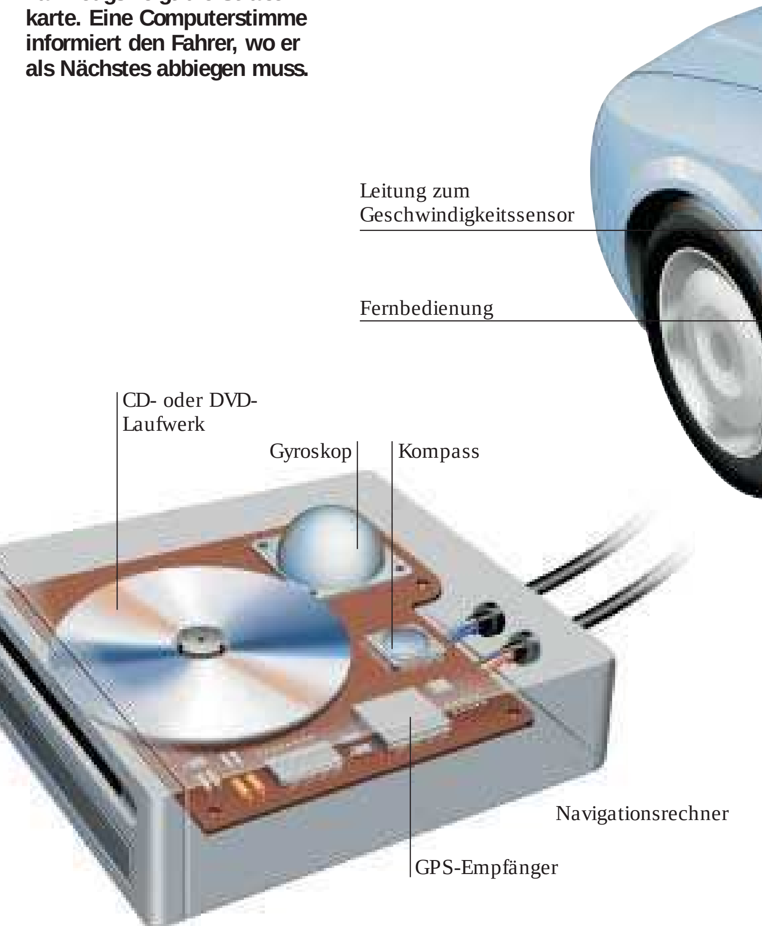
Zusätzlich gibt eine computergenerierte Stimme während der Fahrt Anweisungen wie: „Die nächste Straße rechts abbiegen!" Das darf freilich weder zu früh noch zu spät erfolgen. Niemand möchte eine Minute lang immer wieder hören: „Bereiten Sie sich auf das Rechtsabbiegen vor!" genauso wenig wie „Biegen Sie jetzt sofort rechts ab!" Das Programm benutzt deshalb spezielle Algorithmen, um die sich ständig verändernden Daten über die Fahrzeugbewegung mit dem Kartenmaterial in Einklang zu bringen und dabei den besten Zeitpunkt für Anweisungen zu bestimmen.

Sollen die Kommandos brauchbar sein, muss der Rechner auf genaues und aktuelles Kartenmaterial zurückgreifen können. Navigation Technologies aus Chicago erstellt für einen Großteil Europas – auch für Deutschland – und für die USA die erforderlichen Karten. Bei jedem neuen Gebiet greift das Unternehmen zuerst auf offizielle Produkte zurück, lässt sie jedoch durch eine Heerschar von Kundschaftern verbessern, die jedes Stückchen Straße abfahren und jede einzelne von 150 auswählbaren Besonderheiten ergänzen wie Stoppschilder, Einschränkungen beim Abbiegen an Kreuzungen oder Einschnitte an Gehsteigen für Parkbuchten.

Der Autor **Mark Fischetti** *ist freier Mitarbeiter bei Scientific American.*



Ein Monitor im Cockpit des Fahrzeugs zeigt die Straßenkarte. Eine Computerstimme informiert den Fahrer, wo er als Nächstes abbiegen muss.



Der Navigationsrechner bestimmt aus den Daten von GPS-Satelliten ihre Entfernung zum Fahrzeug. Signale von mindestens vier Satelliten müssen gleichzeitig empfangen werden, um aus diesen Angaben die Koordinaten des Autos zu berechnen. Des Weiteren liefern Gyroskop und Kompass Informationen über die Fahrtrichtung, der Tachosensor liefert Daten zur Geschwindigkeit. All diese Angaben vergleicht der Rechner mit Straßenkarten in seinem Speicher und lokalisiert so das Auto mit einer Genauigkeit von etwa fünf Metern.

Wussten Sie schon … ?

➤ Ende 2001 waren etwa 1,7 Millionen Autos in Deutschland mit einem Navigationssystem ausgestattet. Solche Systeme kosteten Anfang dieses Jahres je nach Typ zwischen 1200 und 3000 Euro. Marktforscher gehen davon aus, dass der Preis auf etwa 750 Euro sinken kann.

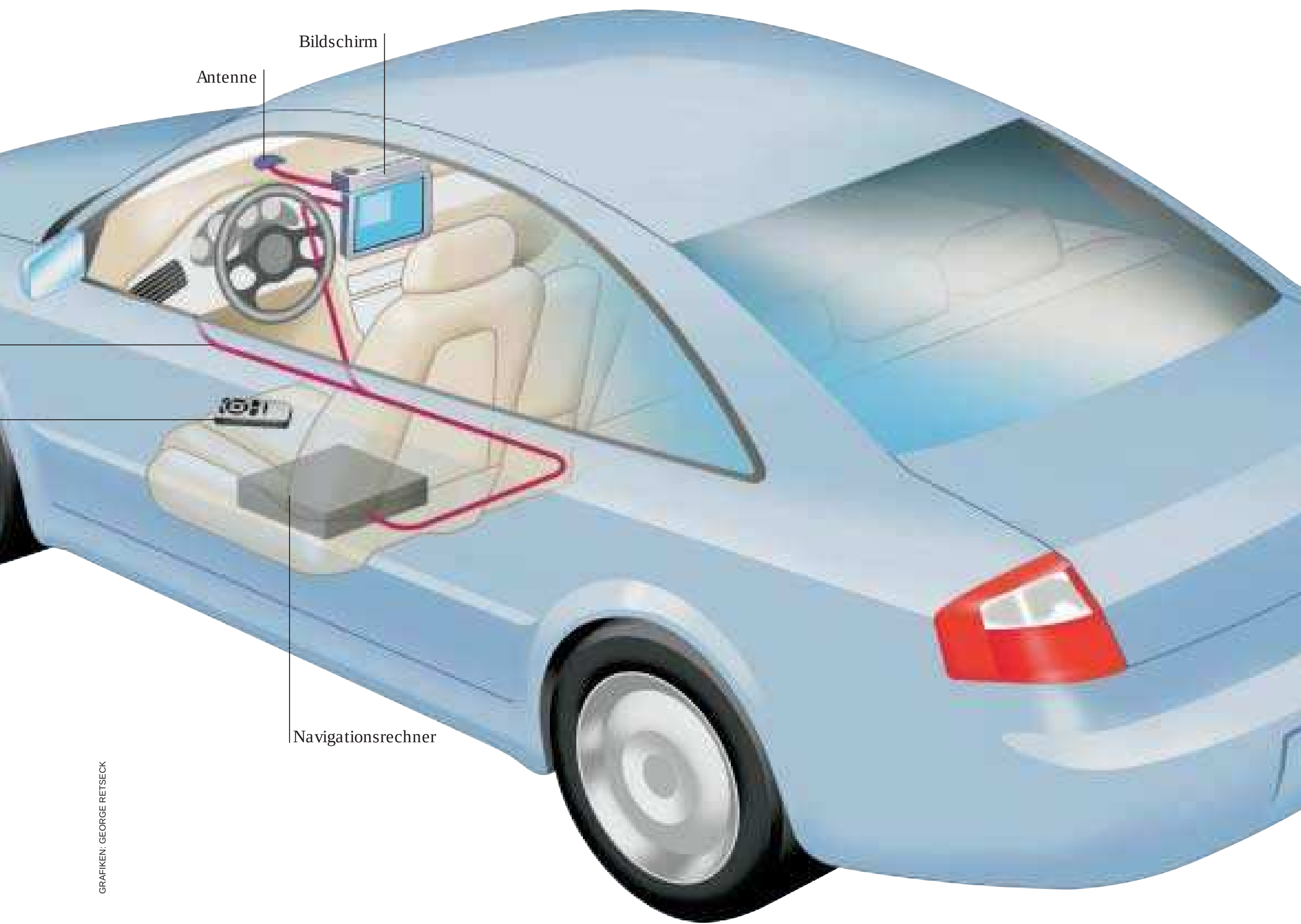
➤ Es ist zwar prinzipiell möglich, die idealste Strecke zu bestimmen, doch der dafür erforderliche Rechenaufwand wäre zu hoch. Jeder Hersteller verwendet deshalb Algorithmen, die in einer annehmbaren Zeit, typischerweise zehn Sekunden, eine möglichst gute Verbindung finden.

➤ Im Jahr 2008 soll das europäische Satelliten-Navigationssystem Galileo in Betrieb gehen. Mit dreißig Satelliten kann die Position auf zwei Meter genau bestimmt werden. Bei dem für militärische Zwecke konzipierten amerikanischen GPS werden die Signale künstlich verschlechtert; zudem kann der Zugang im Krisenfall abgeschaltet werden.

➤ Dynamische Navigation hilft dem Fahrer, Staus auf Straßen zu umfahren. Das Navigationssystem nutzt dazu entweder den in Deutschland fast flächendeckend vorhandenen Verkehrsinfodienst TMC (*Traffic Message Channel*) über UKW oder die Telematik-Stauinfodienste über Mobilfunk. Das Navigationssystem führt den Fahrer dann entlang der vom Verkehrsfunk vorgeschlagenen Alternativroute.

➤ Tragbare Navigationssysteme sind prinzipiell technisch machbar. Die Hersteller von Taschencomputern oder Organizern müssten den Speicherplatz ihrer Geräte auf mindestens 500 Megabytes erhöhen und eine GPS-Ausrüstung einbauen. Dann könnten sich beispielsweise Touristen anzeigen lassen, wie sie eine Sehenswürdigkeit erreichen, Geschäftsleute wüssten, mit welcher U-Bahn sie am schnellsten ihren Gesprächstermin erreichen. So ein Gerät könnte auch ein fest in ein Fahrzeug eingebautes Navigationsgerät überflüssig machen. Bernoulli und IBM bieten bereits ein Gigabyte fassende Mini-Festplatten für Organizer an.

Die GPS-Antenne empfängt die Signale der Satelliten. Deren Datencode enthält verschlüsselt unter anderem eine sehr genaue Uhrzeitangabe und die jeweilige Position des sendenden Flugkörpers.



GRAFIKEN: GEORGE RETSECK

ROBOTIK

Alduro schreitet voran

Mobile Roboter müssen auch mit schwierigem Gelände zurechtkommen. Das gelingt mit Beinen besser als auf Rädern.

Von Manfred Hiller, Jörg Müller und Daniel Germann

Die Natur kennt keine Räder, konstatierte vor einigen Jahren der Fernsehjournalist Thomas Hauer. Diese Erfindung des Menschen erlaubt zwar ein schnelles Fortkommen und den Transport schwerer Lasten, doch sie versagt in unwegsamem Gelände. Je steiler und unebener der Untergrund, desto besser kommt man mit der natürlichen Bewegungsart zurecht: dem Gehen.

Laufmaschinen für Baustellen an Steilhängen, für Forstarbeiten oder für Räumeinsätze nach Bergrutschen gibt es bislang nur in Ansätzen. So genannte Schreitbagger ziehen sich mit ihrem Baggerlöffel vorwärts oder stützen sich damit auf, während Hinterräder sie anschieben. In einer Kooperation mit dem Institut für Robotik der Eidgenössisch-Technischen Hochschule Zürich und einer Schweizer Firma haben wir ein solches Gerät mit hydraulischen Beinen ausgestattet. Dieses Konzept roboTRAC wiederum war die Grundlage für ein weitgehend autonomes Schreitfahrwerk namens Alduro (*Anthropomorphically Legged and Wheeled Duisburg Robot*).

Rund 1,4 Tonnen schwer und mehrere Meter hoch wird das Gerät sein, das vier Beine durch die Welt tragen. Die Energie für die hydraulischen Antriebe und die Elektrik liefert ein Verbrennungsmotor. Alduro soll künftig eine Nutzlast von 300 Kilogramm befördern. Dazu gehört eine Arbeitsplattform, auf der auch ein Arbeitsgerät, beispielsweise ein Greifarm, eine Bohrlafette oder eine Baggerschaufel, montiert ist.

Alduros künstliche Gliedmaßen haben wir denen des Menschen nachempfunden – so erlauben bei Alduro Hüftgelenke Drehungen in alle drei Raumrichtungen, Kniegelenke aber nur Bewegung in einer Richtung. Hydraulische Linearantriebe fungieren als Muskeln, allerdings müssen dazu die linearen Bewegungen ihrer Hydraulikzylinder in Drehungen der Gelenke umgesetzt werden. Das lässt sich beim Knie einfach bewerkstelligen: Der Zylinder wird zwischen Ober- und Unterschenkel montiert, wie ein Scharnier klappt das Gelenk hoch und runter. Die räumliche Bewegung der Hüfte hingegen erfordert schon einen komplexeren Mechanismus, der auch Kräfte umlenken kann. Im Endeffekt vermag jedes unserer technischen Beine – dem menschlichen ähnlich – zumindest im virtuellen Raum nach oben und zur Seite zu schwenken sowie sich um seine Längsachse zu drehen.

Dank dieser großen Beweglichkeit kann Alduro die Plattform auch auf schwierigem Untergrund recht gut in ihrer Lage halten. Soll die Maschine in nicht zu steilem und zu unebenem Gelände ihren Dienst tun, lassen sich die hinteren Fußteller auch durch Räder ersetzen. So wird aus einer vierbeinigen Gehmaschine ein Schreitfahrwerk, das immerhin vier Kilometer pro Stunde schnell sein dürfte.

Um das notwendige Regelungskonzept zu entwickeln, haben wir den Roboter mit allen seinen Komponenten zunächst auf dem Rechner virtuell er-

„Star Wars"-Regisseur George Lucas hat es gewusst: In unwegsamem Gelände wie etwa einer tief verschneiten Landschaft oder an steilen Hängen sind Schreitroboter gegenüber Radfahrzeugen im Vorteil.



DEFD-MOVIES


GERHARD-MERCATOR-UNIVERSITÄT DUISBURG

Noch trägt der mobile Roboter Alduro seinen Bediener nur durch virtuelle Landschaften, das aber verlässlich ohne Mucken und Murren.

zeugt und simuliert. Ein solches *Virtual Prototyping* ist in der Industrie heute üblich, um schon zu einem frühen Zeitpunkt die Machbarkeit eines Vorhabens und die Konstruktionsvarianten zu testen. Damit wird der arbeits- und kostenintensive Aufbau realer Modelle – die allerdings zu einem späteren Zeitpunkt unabdingbar sind – deutlich reduziert.

Hydraulikknie und Vaterstolz

Solch ein virtueller Prototyp simuliert ein System oder Subsystem so realistisch wie unter der jeweiligen Fragestellung erforderlich. Er unterliegt den gleichen physikalischen Gesetzen wie das spätere reale Pendant. Der virtuelle Alduro besteht deshalb aus mechanischen und hydraulischen Anteilen sowie aus elektrischen und informationsverarbeitenden Komponenten.

Zur mathematischen Beschreibung eines solchen mechatronischen Systems eignen sich Zustandsgrößen und deren zeitliche Änderungen. Beim hydraulischen Subsystem ergeben sich dabei Gleichungen für den Druckaufbau in Zylindern, Schläuchen und Ventilen in Abhängigkeit vom strömenden Öl und von Druckunterschieden. Die Zustandsgrößen des mechanischen Subsystems sind Positionen und Geschwindigkeiten der zu bewegenden Körper; die Bewegungsgleichungen vermitteln den Zusammenhang von Beschleunigung und wirkenden Kräften. Beide Systeme sind miteinander verkoppelt: Beispielsweise bewirkt eine Druckänderung im Hydraulikzylinder eines Kniegelenks eine Bewegung zwischen Ober- und Unterschenkel, die aber wiederum den Volumenstrom im Zylinder modifiziert und so auf den Druck zurückwirkt.

Die Steuerung eines derart komplexen Systems muss weitgehend automatisch ablaufen – zu vieles hätte der Bediener sonst zu steuern. Um etwa ein Kippen zu vermeiden, darf immer nur ein Bein angehoben werden, zudem muss es zuvor entlastet werden. Deshalb gibt ein so genannter Gangmustergenerator fortlaufend je nach Gelände und den Eingaben des Bedieners die Schrittfolge vor und steuert die Hydraulikzylinder an. Bei der Schreit-Fahrwerk-Variante wird Alduro auf seinen beiden passiv rollenden Hinterrädern von den Vorderbeinen gezogen. Das erlaubt höhere Geschwindigkeit und Stabilität.

Um das Bedienen der komplexen Maschine zu erleichtern, sieht unser Konzept vor, die Maschine mit einem Joystick zu steuern. Es mag auch sinnvoll sein, Kippkräfte in den Joystick zurückzukoppeln – der Mensch spürt dann nämlich die Folgen extremer Eingaben.

Ein wichtiger Punkt beim Erstellen eines virtuellen Prototypen ist dessen Validierung, also der Nachweis, dass die zu untersuchenden Eigenschaften auch richtig modelliert wurden. Um die Genauigkeit des mechanischen und hydraulischen Modells zu überprüfen, haben wir deshalb aus den Vorgaben des virtuellen Prototypen ein reales Bein im Maßstab 1:1 gebaut und getestet. Der Prüfstand wurde so ausgelegt, dass es sich aus eigener Kraft auf- und abwärts bewegen konnte. Auf diese Weise haben wir die Belastungen in den Anschlussstellen an die Plattform untersucht. Sowohl die hier verwendeten hydraulischen Komponenten als auch das elektronische System sollen später das reale Gefährt voranbringen.

Die Designphase ist abgeschlossen. Manche Ungereimtheiten und Kinderkrankheiten ließen sich dank des virtuellen Prototyps vorab bereinigen. Im Laufe der nächsten Monate bauen wir eine echte Maschine, um sie im Gelände zu erproben. Sicher ist Alduro noch weit entfernt von Laufrobotern nach „Star Wars“-Art, aber Ähnlichkeiten glauben wir schon mit gewissem Väterstolz entdecken zu können. ■

__Manfred Hiller__ lehrt Mechatronik an der Gerhard-Mercator-Universität Duisburg. __Jörg Müller__ hat im Rahmen des Projekts promoviert und arbeitet nun in der Industrie. __Daniel Germann__ ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und leitet das Projekt Alduro.



MEMBRANEN

Ein Netz für kleine Fische

Dass sie große Moleküle außen vor lassen, wird von Membranen erwartet. Dass manche aber die kleinen ausbremsen, macht Petrochemiker euphorisch.

Von Werner Gans

Energieaufwendig, teuer und alles andere als umweltfreundlich – Chemiker trennen Stoffgemische heute wie vor 130 Jahren meist durch „fraktioniertes Destillieren", also durch Verdampfen bei gestaffelten Temperaturen. Dabei ist der Bedarf an „sanften" Trennungsmethoden groß, vor allem in der Petrochemie, die die weltweit täglich geförderten 75 Millionen Fass Erdöl zu Kraftstoffen, Schmierölen und Feinchemikalien aufbereitet. Aber auch zur Entsalzung von Meerwasser oder zur Entgiftung belasteter Abwässer sind Alternativen gefragt.

Deutlich preiswerter und Energie sparender als Destillierkolonnen arbeiten Membranen. Diese Trennwände sind im Idealfall nur für die zu gewinnenden Stoffe durchlässig, sodass durch eine Druckdifferenz zwischen dem zu trennenden Stoffgemisch und einem „Auffangbehälter" die gewünschte Substanz hindurchgetrieben wird. Dabei gibt es verschiedene Möglichkeiten. Das Ausgangsgemisch kann eine Flüssigkeit sein, das Produkt aber ein Gas, das in einer Kühlfalle kondensiert; auf beiden Seiten können jedoch jeweils auch Gase oder Flüssigkeiten vorliegen.

In jedem Fall müssen die Membranen zwei wichtige, dabei miteinander gekoppelte Eigenschaften aufweisen: Selektivität und Permeabilität. Hohe Selektivität bedeutet hohe Produktreinheit und geringe Betriebskosten: Vereinfacht gesagt lässt die Membran nur Moleküle einer bestimmten Sorte oder Größe hindurch. Ist sie sehr permeabel, sprich durchlässig, geschieht das mit hohem Durchsatz, man benötigt also wenig Membranfläche und muss auch nicht so viel Kapital investieren. Doch leider: Je besser eine konventionelle Polymermembran zwei Stoffe trennt, desto geringer wird ihre Durchlässigkeit und umgekehrt. Dieses Dilemma zu lösen ist ein Forschungsschwerpunkt der Branche.

Ein viel versprechender Ansatz sucht die Eigenschaften „umgekehrt selektiver" Polymermembranen zu verbessern. Entgegen der intuitiven Vorstellung vom Sieb mit mehr oder weniger großen Poren lassen diese Strukturen vor allem größere Molekül passieren und halten kleinere zurück. Dieser überraschende Effekt beruht auf dem Zusammenspiel von zwei Eigenschaften des Systems Membran/Stoffgemisch: Zur Diffusion der Stoffe durch die Poren gesellt sich ihre unterschiedliche Löslichkeit im Polymer. Die Permeabilität einer solchen Membran für ein bestimmtes Molekül A berechnet sich deshalb als Produkt aus Löslichkeit und Diffusionskoeffizient. Mit diesen beiden Größen lässt sich auch die Trennschärfe berechnen: Molekül A wird gegenüber Molekül B umso mehr bevorzugt, je höher seine Löslichkeit und je größer sein Diffusionskoeffizient im Verhältnis zu den Werten von B ist.

Polymere mit einer sehr flexiblen Hauptkette oder starre Polymere mit geringer Packungsdichte, das heißt mit viel freiem Volumen zwischen den Strängen, können, als Sieb betrachtet, Moleküle unterschiedlicher Größe nur schlecht trennen. Deshalb werden Membranen daraus von vornherein so hergestellt, dass die Stoffe A und B annähernd gleich gut hindurchdiffundieren. Nun entscheidet nur noch das Verhältnis ihrer Löslichkeiten über die Selektivität. Erfreulicherweise wächst sie mit der Durchlässigkeit.

Nanostaub sorgt für Überraschung

Derartige umgekehrt selektive Membranen helfen bereits bei der Reinigung von Erdgas und separieren organische Monomere bei der Herstellung von Polyolefinen von Stickstoff. Als Polymere werden zum Beispiel verzweigte Polyacetylene, wie Poly(4-methyl-2-pentin), kurz PMP, verwendet, sie bleiben über weite Temperaturbereiche glasartig starr – wichtig für technische Anwendungen –, sind amorph und von geringer Dichte.

Um die Selektivität auf spezielle Anforderungen zuzuschneidern, experimentieren Chemiker zurzeit mit einem Zusatz von anorganischen Partikeln, die nur wenige Nanometer groß sind. Forschern von der Universität Texas in Austin und



PREMIUM

Um aus Erdöl diverse Kraftstoffe, Schmieröle und andere wertvolle Produkte abzutrennen, setzen petrochemische Betriebe neben Destillierkolonnen gern Membranen ein.

der North Carolina State University in Raleigh gelang hier kürzlich ein regelrechter Durchbruch.

Die Idee klingt einfach: Die umgekehrte Selektivität von PMP beruht auf dem großen freien Volumen, das die Diffusion erleichtert. Diese Hohlräume entstehen, weil sich Polymerketten in diesem Material nicht dicht aneinanderlagern können. Füllpartikel sollten die Molekülpackung zusätzlich stören und somit das freie Volumen weiter erhöhen. Diese Spekulation der Wissenschaftler stand allerdings im Gegensatz zu etablierten Modellen und Experimenten. Die Füllpartikel in dem anorganisch-organischen Verbundwerkstoff vermindern nämlich bei allen bisher untersuchten Membranen die für den Transport zur Verfügung stehende Durchtrittsfläche; allerdings waren die beigemengten Partikel bislang wesentlich größer als ein paar Nanometer.

Die Forschungsgruppen mengten äußerst feinen Quarzstaub bei – der geschätzte Teilchendurchmesser betrug 13 Nanometer. Damit hatten diese Teilchen etwa dieselbe Größenordnung wie die Polymerketten. Im Gegensatz zu anderen quarzähnlichen Mineralien, mit denen man auch schon in Membranen experimentiert hatte, waren diese Quarzpartikel nicht porös; ihr Beitrag zu Permeabilität und Selektivität der Membran bestand allein darin, die Packungsdichte der Polymerketten zu verringern.

Entgegen allen Modellvoraussagen wuchs die Permeabilität um bis zu 240 Prozent bei einer maximalen Dotierung von 50 Gewichtsprozent Quarzstaub. Mit wachsender Konzentration stieg auch die Selektivität der Membran für n-Butan gegenüber Methan beträchtlich. Hohlräume in Polymeren wie PMP sind bis zu einem Nanometer groß, die maximale Zugabe von Quarzsand erhöhte ihren Durchmesser nur um weniger als 0,1 Nanometer. Die Möglichkeit, das freie Volumen so fein abzustimmen, eröffnet den Chemikern neue Möglichkeiten: Bei rein nach der Größe siebenden Membranen, bei denen der Löslichkeitseffekt kaum eine Rolle spielt, könnte der feine Staub die Porengröße im Subnanobereich modifizieren. Manche zu separierenden Moleküle unterscheiden sich nur um zwei hundertstel Nanometer. ■

__Werner Gans__ hat an der ETH Zürich in theoretischer Chemie promoviert. Er arbeitet als Übersetzer wissenschaftlicher Texte und koordiniert zwei Graduiertenprogramme an der Freien Universität Berlin.

AM RANDE

Schöner Urlauben – im richtigen Outfit ist der Strand nie weit

Urlaub am Meer soll ja gesund sein – die frische Luft, das Salz, das beruhigende Spiel der Wellen. All das hätte ich auch gern, aber was soll ich machen, der Ruf der Berge zieht mich auch heuer wieder in die Alpen. Doch diesmal muss ich nicht ganz verzichten: Ozeanische Gefühle beim Gipfelgruß sind mir gewiss.

Dazu verhilft die Unterwäsche des deutschen Textilherstellers Kaulberg. Seine Kollektion „well being“ besteht aus Baumwolle, Elasthan und – SeaCell, der ersten Faser mit pulverisierten Algen, entwickelt von einer Tochter des Chemiekonzerns mg technologies. Hält die Alge als solche bekanntermaßen die Haut straff, frisch und geschmeidig, schafft sie das, wissenschaftlich geprüft, auch verpackt in der Faser. SeaCell spendet im feuchten Hautmilieu – und davon hat der Bergwanderer reichlich – Mineralien, Aminosäuren und Vitamine – und davon braucht er viel. Besonders beeindruckend: In der Waschmaschine behält die Faser ihre Wirkstoffe vornehm bei sich.

Also, hoch auf den Gipfel und tief einatmen – umspült mich da nicht der Geruch des Meeres? Wellness pur. Schade nur, dass die Wäsche nicht zugleich selbsttrocknend ist, man hätte noch eine atmungsaktive Mikrofaser einweben sollen. Und vielleicht auch noch ein wenig von dem speziellen Polyamid der BASF AG, das dank Titandioxid-Partikeln gegen das heftige UV-Licht hier oben schützt. Ach ja, auch die mikrofeinen Spezialwachs-Kügelchen wären recht, die bei Hitze schmelzen und so den Körper kühlen, bei Kälte erstarrend Wärme abgeben. In klammen Klamotten auf dem windumtosten Gipfel könnte ich die smarte Thermoregulierung gut gebrauchen.

Aber das kommt sicher alles noch. Genauso wie der im Stoff eingearbeitete Pulsmesser, der beim Aufstieg das optimale Schritttempo vorgibt. Nicht zu vergessen ein Navigationssystem in der Gürtelschnalle und ein UMTS-Handy im Hemdkragen. Wenn ich das mit dem 3-D-Display in meiner Sonnenbrille und dem Palm in meiner Armbanduhr vernetze, lasse ich mir zu meiner Gipfelrast ein wenig Meeresrauschen von der Nordsee via Internet einspielen. Wäre das nicht die perfekte Idylle, Wellness pur?

Klaus-Dieter Linsmeier

HERZDIAGNOSTIK

Frühwarnsystem gegen den Infarkt

Moderne Computertomografen entdecken Verschlüsse der Herzkranzgefäße schon im Frühstadium.

Von Marc Kachelrieß

Anhaltende Schmerzen in der Brust, die weithin ausstrahlen, auch Übelkeit und Erbechen, Druckgefühl und Atemnot, kalter Schweiß und Kreislaufkollaps – die Symptome eines Herzinfarkts sind dramatisch. Umso erstaunlicher ist es, dass etwa zwei Drittel der Patienten zuvor keinerlei Beschwerden verspüren, obwohl Kalkablagerungen ihre Herzkranzgefäße schon etwa zur Hälfte verstopft haben. Leider entdecken gängige Vorsorgetechniken wie Elektrokardiogramm (EKG), Ultraschall oder Myokardszintigrafie kaum feinere Veränderungen in den Blutgefäßen. Das vermag zwar die Herzkatheteruntersuchung, doch sie ist nicht nur unangenehm für den Patienten, sondern auch riskant: Etwa 1,5 Prozent der Untersuchten tragen bleibende Schäden davon, 1,5 Promille sterben sogar.

Eine echte Alternative bietet inzwischen die Computertomografie (CT). Sie erkennt Strukturen von bis zu einem halben Millimeter Größe – das genügt selbst für die Abbildung feinster Verästelungen der Herzkranzgefäße von maximal fünf Millimeter Durchmesser. Außerdem arbeiten heutige Geräte sehr schnell: Eine Ganzkörperaufnahme dau- ▶

Damit eine 3-D-Darstellung des Herzens mit der Computertomografie gelingt, müssen Algorithmen die Messdaten nach den verschiedenen Schlagphasen des Herzens zuordnen.



INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PHYSIK, UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

ert längstenfalls eine Minute. Raffinierte Techniken ermöglichen sogar gute Aufnahmen des schlagenden Herzens.

Bei einer Tomografie wird der Patient quasi in Scheiben aufgenommen, und zwar eine nach der anderen. Bis weit in die 1980er Jahre rotierte dabei eine Röntgenröhre um den Körper und sandte einen einzelnen Strahlenfächer aus etwa tausend Einzelstrahlen aus. Für jede weitere Aufnahme fuhr die Patientenliege sodann ein Stück weiter. Seit 1989 erfolgt dieser „Scan" kontinuierlich: Bei der Spiral-CT drehen sich Röntgenröhre und gegenüberliegender Detektor um den Körper, der gleichmäßig durch das Messsystem gefahren wird. Aus Sicht des Patienten kreist diese Anordnung, wie der Name sagt, auf einer Spirale um ihn herum.

Der so genannte Kegelstrahl-Spiral-CT kam in diesem Jahr auf den Markt. Seine Röhre sendet einen Strahlenkegel aus, der sich in der Rotationsebene in 16 Strahlenfächer aufteilt. Diese Geräte nehmen also 16 Schnittbilder gleichzeitig auf. Pro Umdrehung benötigen Röntgenröhre und Detektor nur 0,42 Sekunden. Dabei müssen die mehr als hundert Kilogramm schweren Bauteile etwa das Dreizehnfache der Erdbeschleunigung aushalten.

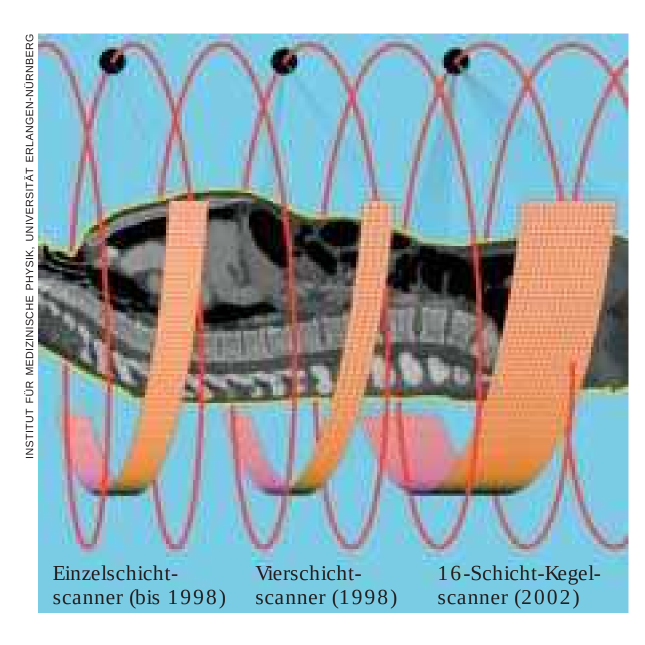
Dieser Detektor misst, wie stark der Körper des Patienten die Röntgenstrahlen absorbiert hat. Heutige Flächendetektoren bestehen aus 16 Zeilen mit jeweils etwa tausend Sensorelementen. Die Dicke der „Körperscheiben" schrumpfte von 10 Millimetern vor zehn Jahren auf heute 0,75 Millimeter. Während einer Umdrehung misst das System in tausend Winkelstellungen; dabei fallen jeweils bis zu 16 000 Messwerte an. Ein Standardscan von dreißig Sekunden Dauer erzeugt letztlich einen Rohdatensatz von etwa zwei Gigabyte.

Die Größe der Detektorelemente ist so ausgelegt, dass in der Rotationsebene Strukturen von bis zu 0,5 Millimetern unterschieden werden können. Die Anzahl und Breite der Detektorzeilen bestimmen die Auflösung in der Richtung senkrecht dazu. Bei Kegelstrahl-Scannern können die Detektorzeilen elektronisch kombiniert werden, um die Schichtdicke im Bereich von 0,75 bis 2,5 Millimetern zu variieren.

Aus den Messdaten berechnet ein Computer die zugehörigen Bilder. Nach einer Filterung projiziert er sie entlang der ursprünglichen Strahlrichtung zurück in ein zweidimensionales Koordinatensystem („gefilterte Rückprojektion"). Dieses Verfahren funktioniert allerdings nur, wenn die Strahlen nahezu parallel auf den Detektoren auftreffen. Bei der Kegelstrahl-CT stehen die Strahlenfächer schräg zueinander; deswegen berücksichtigen spezielle Algorithmen den Einfallswinkel: Der Feldkamp-Algorithmus ist eine dreidimensionale Version der gefilterten Rückprojektion. Er arbeitet nicht schichtweise, sondern projiziert die Daten entsprechend der Messrichtung (also so, wie sie auf dem Detektor auftreffen) in ein dreidimensionales Koordinatensystem zurück.

Bei dem so genannten Advanced-Single-Slice-Rebinning (ASSR) werden zunächst gekippte, zweidimensionale Bilder erzeugt und dann zu parallelen Schnittbildern umgerechnet. Bei gleicher Bildqualität arbeitet das letztere Verfahren schneller und stellt weniger Anforderungen an die technische Ausstattung.

Genau wie bei der Fotografie verwischt Bewegung auch bei der Computertomografie das Bild. Dieses Problem löst eine andere Rechenmethode, die phasenkorrelierte Rekonstruktion. Sie verarbeitet nur Daten gleicher Herzschlagphasen zu Schnittbildern. Auf hundert Millisekunden genau liefert sie eine Bildfolge der Kontraktionszustände. Für solche zeitaufgelösten Aufnahmen



INSTITUT FÜR MEDIZINISCHE PHYSIK, UNIVERSITÄT ERLANGEN-NÜRNBERG

In den letzten Jahren nehmen immer bessere Tomografen immer feinere Schichten auf, davon aber mehr und in insgesamt kürzerer Zeit. Bis 1998 betrug die Dicke eines Tomogramms noch fünf Millimeter, 70 Millisekunden waren dafür zu veranschlagen. Dann durchleuchtete ein Gerät bereits vier Schichten von je einem Millimeter Dicke in 60 Millisekunden. In diesem Jahr erreichte ein Tomograf den Rekord 16 Schichten à 0,75 Millimeter, die Aufnahmezeit betrug nur noch 20 Millisekunden.

(4-D-Bildgebung) muss die CT mit dem Herzschlagrhythmus synchronisiert werden. Dazu dient entweder ein Elektrokardiogramm, also eine Aufzeichnung des elektromagnetischen Signals, das die Herzkontraktion steuert. Oder der Computer berechnet aus den CT-Daten ein Kymogramm, für das der Schwerpunkt des Herzens in den einzelnen Schlagphasen ausgewertet wird. Zur Rekonstruktion der Schnittbilder dienen dann nur Aufnahmen mit gleicher Position des Herzschwerpunkts. Die Kymografie verzeiht Extrasystolen (das sind elektrische Erregungen, die keine Kontraktion des Herzens auslösen) – das EKG dagegen zählt sie mit.

Freilich hat auch die Computertomografie ihre Schattenseite: Sie arbeitet mit ionisierender Röntgenstrahlung. Die lässt sich mittlerweile durch technische Hilfsmittel deutlich reduzieren – besonders effektiv ist die an die Anatomie angepasste Modulation des Röhrenstroms. Dabei werden stärkere oder schwächere Strahlen durch den Patienten geschickt, je nachdem, welche Körperteile in welcher Richtung durchdrungen werden müssen. So ist zum Beispiel ein hoher Röhrenstrom notwendig, wenn beide Schultern gleichzeitig durchleuchtet werden müssen (also quer von rechts nach links). Wird dagegen der Schulterbereich von vorne nach hinten durchstrahlt, reicht ein niedrigerer Röhrenstrom aus.

Geringe Strahlungsdosen verschlechtern normalerweise die Bildqualität, denn das unvermeidbare Rauschen kommt dann stärker zum Tragen (höhere Dosen erhöhen den Unterschied zwischen Nutzsignal und Rauschuntergrund). Die mehrdimensionale adaptive Filterung (MAF) löst das Problem durch einen Trick: Sie ermittelt vor der eigentlichen Bildrekonstruktion die Messwerte maximaler Schwächung (hier muss der Röntgenstrahl besonders dichte Körperpartien durchdringen), die wesentlich zum Bildrauschen beitragen, und korrigiert sie unter Zuhilfenahme benachbarter, besserer Daten. Dadurch wird das Rauschen reduziert, ohne die Bildschärfe zu verringern.

Im Endeffekt kann dieses Bündel technischer Maßnahmen die Strahlenbelastung einer CT-Untersuchung um bis zu fünfzig Prozent senken – vorausgesetzt, der Arzt setzt die Hilfsmittel auch ein. Das ist leider nicht selbstverständlich; schon heute ließe sich oft die Dosis senken, würde die Untersuchung stärker auf den jeweiligen Patienten ausgerichtet. Noch ist die Computertomografie keine Routinemethode für die Herzvorsorge, doch in einigen Jahren dürften gefährdete Personen früher vor ihrem Infarktrisiko gewarnt werden. ■



Der promovierte Physiker ***Marc Kachelrieß*** *arbeitet am Institut für Medizinische Physik der Friedrich-Alexander-Universität Erlangen-Nürnberg.*

Literaturhinweis

Computertomographie. Von Willi A. Kalender, Publicis MCD, 2000.

Weblinks bei ***www.spektrum.de*** *unter „Inhaltsverzeichnis“*

TECHNOGRAMM

PHOTOVOLTAIK

Solarzelle mit Brille

Einigkeit macht stark: Tandem- oder Tripelsolarzellen verwerten bis zu dreißig Prozent des auffallenden Lichts. Dazu bestehen sie aus Lagen spezieller Halbleiterverbindungen der III. und V. Hauptgruppe des Periodensystems. Ein solcher Schichtaufbau ergibt sozusagen zwei beziehungsweise drei verschiedene Solarzellen, die jeweils andere Bereiche des Lichtspektrums ausnutzen. Leider sind die Fertigungsverfahren und Materialien sehr viel teurer als die konventioneller Silizium-Photovoltaik, deshalb lohnen sich diese Solarzellen derzeit lediglich zur Versorgung von Raumflugkörpern. Ein Trick soll der Technik auch auf der Erde Marktchancen geben.

In Konzentratorzellen bündeln Linsen das Licht auf Tandemschichten, die dann entsprechend kleiner ausfallen können und demgemäß preiswerter sind. Kürzlich gelang es Forschern des Fraunhofer-Instituts für Solare Energiesysteme in Freiburg, Sonnenlicht 500- bis 1000fach zu konzentrieren und so 21 Prozent Wirkungsgrad im Feldtest zu erreichen. Wie eine industrielle Fertigung solcher Konzentratorzellen aussehen kann, soll nun in einer Pilotanlage erprobt werden.



FHG-ISE

Konzentriertes Licht – kleinere Solarzellen

RESTAURATION

Porentief rein

Holz ist bei Insekten und Schimmelpilzen als Heimstatt sehr beliebt – soll es als Werkmaterial dienen, muss es aber unbesiedelt sein. Deshalb wurde Holz in den 1940er bis 1980er Jahren gerne mit Schutzmitteln wie Lindan und DDT behandelt. So blieb das Material zwar frei von Schädlingsbefall, doch Lindan dünstet allmählich aus und belastet die Raumluft; DDT kristallisiert als weißer Belag an der Oberfläche aus. Jetzt haben Fraunhofer-Wissenschaftler eine umweltverträgliche und materialschonende Methode entwickelt, Kunstgegenstände aus Holz wieder zu entgiften. Dabei verwenden sie überkritisches Kohlendioxid, das sich bei hohem Druck gleichzeitig wie ein Gas und wie eine Flüssigkeit verhält. In diesem Zustand diffundiert das Kohlendioxid wie ein Gas schnell in das Material hinein, um dort wie eine Flüssigkeit das Holzschutzmittel zu binden. Lässt der Druck nach, befördert das entweichende Kohlendioxid die Schadstoffe zu einem Aktivkohlefilter. Das Verfahren entfernt bereits bis zu 75 Prozent des DDTs und bis zu 90 Prozent des Lindans. *(Fraunhofer Gesellschaft, 4. Juli 2002)*



ROLAND PUNGE

Überkritisches Kohlendioxid reinigte diese Figur von DDT-Rückständen.

GERB SCHWINGUNGSISOLIERUNGEN

Die Macht der Feder

Als Jahrhundertbauwerk wurde sie im Juni 2000 eingeweiht, als Millionengrab drohte sie nur Tage später zu enden: Die Londoner Millennium-Brücke schwang unter den Füßen tausender Passanten bis zu zehn Zentimeter seitlich aus, die Passage war alles andere als angenehm. Dass die Brücke im Frühjahr dieses Jahres wieder geöffnet werden konnte, verdankt ihr Architekt Sir Norman Foster unter anderem der Berliner Firma Gerb.

Nach einem Jahr der Analyse war klar, dass die Hängebrücke mit ihren aus ästhetischen Gründen seitlich ausgerichteten Pfeilern auf Schwingungen von einem Hertz stärker reagiert als erwartet. Genau dies entspricht aber dem Rhythmus von Passanten, die auf leichte laterale Bewegungen des Untergrundes wiederum mit einem Seemannsgang reagieren: Sie gehen breitbeiniger und stützen sich mit den Füßen seitlich ab. Hunderte von ihnen verstärken somit die Eigenbewegung der Brücke und bringen sie ins Schlingern.

Mit Problemen dieser Art wurden Erfinder, Techniker und Ingenieure schon früher konfrontiert, doch die industrielle Revolution des 19. Jahrhunderts hat sie verschärft: Immer größere Maschinen ermöglichten nicht nur die Produktion im industriellen Maßstab, sie machten auch Lärm und erschütterten den Untergrund. Solche Vibrationen schaden nicht zuletzt den Maschinen selbst. Anfangs genügten dämpfende Unterlagen aus Filz oder Kork, doch gegen starke Erschütterungen halfen nur stählerne Spiralfedern, im Fachjargon Schraubendruckfedern genannt. Einer der Pioniere auf diesem Gebiet war der deutsche Ingenieur William Gerb, der 1907 in Berlin eine „Gesellschaft für Isolierung gegen Erschütterungen und Geräusche“ gründete.

Pendel oder Federn nehmen Schwingungen auf und dämpfen sie ab. Die verwendeten Stahlfedern können je nach Materialstärke, Abmessungen, Anzahl der Windungen und den verwendeten Stahlsorten bis zu 250 000 Kilogramm allein an statischer Belastung verkraften. Zu Anfang jeder Planung berechnen die Ingenieure die so genannten Eigenfrequenzen des zu schützenden Objekts (siehe Stichwort). Schon ein simpler Quader kann sich bei freier Aufhängung in Richtung seiner Seitenflächen bewegen. Diesen drei „Freiheitsgraden“ entsprechen drei Eigenfrequenzen (die theoretisch auch identisch sein können). Zudem kann ein solcher „Einmassenschwinger“ in diesen Richtungen auch rotieren, was drei weitere Eigenfrequenzen beisteuert. Hinzu kommen Pendelschwingungen, die durch Kopplung von Bewegungen in den Grundrichtungen entstehen und die ebenfalls berücksichtigt werden müssen.

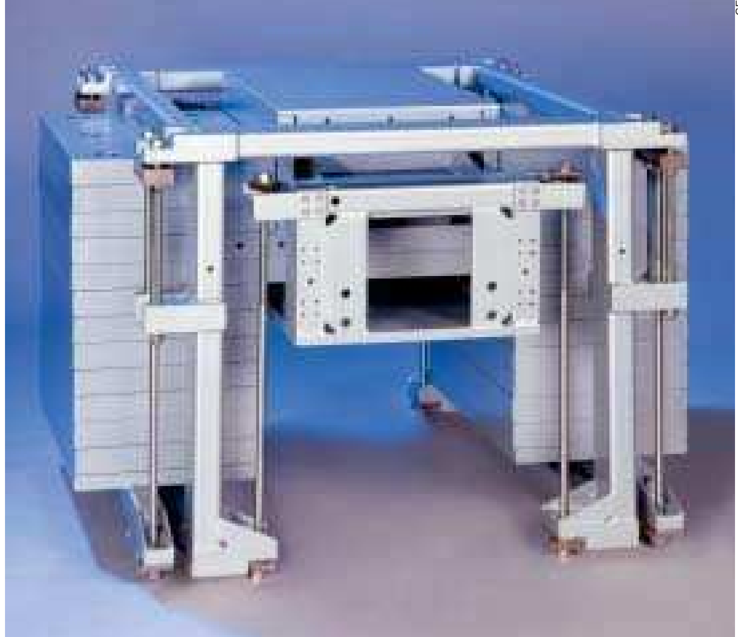
Theoretisch würden all die Einzelteile der Millennium-Brücke, dieses gesamten Komplexes aus Betonplatten, Trägern, Stahlseilen, Asphaltbelag und anderen Komponenten, weitaus mehr als tausend Eigenfrequenzen ergeben. Dank ihrer Erfahrung konnten sich die Ingenieure aber damit begnügen, einige hundert zu berechnen. Das Ergebnis waren 58 „Gegenschwing-Elemente“ an ent-

Das Unternehmen im Profil

Die Gerb Schwingungsisolierungen GmbH und Co. KG existiert seit 1907. Das weltweit marktführende Unternehmen beschäftigt derzeit 320 Mitarbeiter, davon 90 Maschinenbauer und Bauingenieure und zwei Physiker. Der Jahresumsatz betrug 2001 rund 30 Millionen Euro. Hauptsitz dieser konzernunabhängigen Gesellschaft ist Berlin. Fertigungsstätten gibt es auch in Brasilien, China, Frankreich und Indien, zudem Beratungsbüros in zahlreichen Ländern.



MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER FIRMA GERB



GERB

Sie sollte ein zukunftsweisendes Wahrzeichen Londons sein, doch kurz nach der Eröffnung musste die Millennium-Brücke wieder geschlossen werden, da Fußgänger sie zu stark zum Schwingen brachten. Die Rettung: Federelemente (oben) tilgen nun die Vibrationen.

GIS BRIDGEWATER / MIT FREUNDLICHER GENEHMIGUNG DER FIRMA GERB



Keine Straßenbahn vermag den Musikgenuss in der elastisch gelagerten Bridgewater Hall zu stören.

scheidenden Stellen, nämlich acht jeweils an Pendeln befestigte Gewichte, um horizontale Schwingungen zu tilgen, sowie fünfzig auf Stahlfedern gelagerte Massen für die vertikalen Bewegungen.

Diese Art von Problemstellung gehört zum Typus „Schwingungstilgung“ – die störenden Auslenkungen müssen so weit wie möglich ausgeglichen werden. Etwas geringere Ansprüche stellen die Dämpfungsaufgaben. Bei der Aktiv- beziehungsweise Quellenisolierung werden die Schwingungen eines Objektes lediglich gedämpft, um es vor sich selbst zu schützen oder um seine Umgebung vor den Vibrationen zu bewahren. Eine Aufgabe dieser Art stellen beispielsweise die Rotationsdruckmaschinen großer Druckhäuser mit ihren rotierenden Walzen. Für ähnliche Fälle hat Gerb schon vor fünfzig Jahren ein patentiertes System entwickelt: Die mehrere hundert Tonnen schwere Maschine steht auf einem elastischen Fundament aus Federpaketen, jedes aus zwei Schalen und Schraubendruckfedern dazwischen aufgebaut.

Auch beim dritten Problemtypus geht es um Dämpfung. Die „Passiv- oder Empfängerisolierung“ soll die auf ein Objekt aus der Umgebung einwirkenden Schwingungen verringern. Das reicht bis zur kompletten elastischen Lagerung von Gebäuden. Beispielsweise wurde die Bridgewater Hall, eine große Konzerthalle in Manchester, 1996 unmittelbar neben einer Straßenbahnlinie erbaut. Deren Erschütterungen hätten den Musikgenuss der bis zu 2400 Besucher wohl erheblich beeinträchtigt, deshalb steht das Gebäude auf 280 Federpaketen mit insgesamt 4828 Schraubendruckfedern.

Solche elastische Lagerung verhindert auch Risse in Häusern, die in Bergbaugebieten durch Senkung und Setzung des unterhöhlten Bodens bedroht sind – oder gar ihren Einsturz; die Federelemente gleichen Bodenbewegungen in gewissem Maße einfach aus. Seit dem ersten Einsatz dieser Technik vor etwa dreißig Jahren wurden mehr als 500 Gebäude erfolgreich vor Bergschäden bewahrt.

Der Schwingungsschutz sollte auch noch in hundert Jahren einwandfrei arbeiten. Stahl ist ein Werkstoff, dessen elastisches Verhalten sehr konstant bleibt, sofern er nicht überlastet wird. Die Ingenieure berechnen ihre Federelemente dementsprechend so, dass sie „dauerfest“ sind. Ein Vorteil, der auch in Erdbebengebieten gerne und zunehmend genutzt wird.

Klaus-Dieter Linsmeier

Der Autor ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

STICHWORT

Ob Feder oder Pendel, ob elektrischer Schwingkreis oder Atom – schwingungsfähige Systeme oszillieren auf Grund von Materialeigenschaften und Konstruktion nach einer Anregung – beispielsweise dem Auslenken einer Saite – mit bestimmten Schwingungszahlen, den Eigenfrequenzen. Werden sie periodisch mit genau einer Eigenfrequenz angeregt, reagieren sie am stärksten; man spricht dann von Resonanz.

BUNDESTAGSWAHL TEIL III:

Forschungspolitik vor der Wahl

Im Wahlkampf sind Sachargumente rar. Deshalb stellt Spektrum der Wissenschaft die Konzepte der Parteien zur Forschungspolitik vor. Nach den Lebenswissenschaften in Teil I im August-Heft folgen hier die Positionen zu Großprojekten in der Physik und den Technikwissenschaften.



GROSSFORSCHUNG

„Weltmeister aller Klassen“

Nur in einem sind sich alle einig: Um die Forschungslandschaft in Deutschland attraktiver und international konkurrenzfähiger zu machen, muss gehandelt werden. Die Diskussion darüber entfacht sich vor allem an Großforschungsprojekten.

Von Claus M. Schmidt

Bei der Eroberung des Weltraums sind zwei Probleme zu lösen: die Schwerkraft und der Papierkrieg. Mit der Schwerkraft wären wir fertig geworden.

Wernher von Braun

Deutschland hat den Anschluss an die Spitzengruppe der führenden Industrienationen der Welt in den neunziger Jahren verloren“, so konstatierte die Bundesministerin für Bildung und Forschung, Edelgard Bulmahn, als sie den Bundesforschungsbericht des Jahres 2000 vorlegte. In den 1970er und 1980er Jahren hingegen sei es selbstverständlich gewesen, dass die Bundesrepublik im internationalen Vergleich an der Spitze der Forschungsinvestitionen gestanden habe.

Dieser Rückschritt lässt sich mit Zahlen verdeutlichen: Während in den Jahren 1989 bis 1997 die Pro-Kopf-Ausgaben für Forschung und Entwicklung in den USA von 581 auf 794 und in Japan von 482 auf 715 US-Dollar stiegen, hielten sie in Deutschland im gleichen Zeitraum kaum mit der Inflationsrate Schritt. Hier stiegen sie umgerechnet von 488 auf 511 US-Dollar.

Gerne verweist die Bundesregierung auf jene schwierigen Jahre nach der Wiedervereinigung – eine Phase, die von der Koalition aus CDU/CSU und FDP gelenkt wurde. Und sie lässt keine Gelegenheit aus, auf die forschungspolitische Trendwende im Wahljahr 1998 zu verweisen, als Rot-Grün die Regierungsverantwortung übernahm. Dabei war damals „Innovation“ nicht nur bei der SPD, sondern auch bei der CDU/CSU das große neue Wahlkampfthema neben der vertrauten Arbeitslosigkeit. Inzwischen sind diese beiden Themen verbunden, denn Innovation, also Forschung und Entwicklung, wird als wesentlicher Motor des wirtschaftlichen Wachstums und der Schaffung von Arbeitsplätzen angesehen. Entsprechend kämpfen die Parteien auch mit dem Schlagwort Innovation um die Stimmen der Wähler.

Allerdings: Die im letzten Juni durch die Bund-Länder-Kommission verabschiedete Steigerung der Mittel für die Max-Planck-Gesellschaft und die Deutsche Forschungsgemeinschaft um 3,5 Prozent für das Jahr 2003 dürfte für einen deutlichen „Ruck“ bei weitem nicht ausreichen. Denn unsere großen Mitbewerber Japan und die USA können auf dem Sektor Forschung und Entwicklung mit einer Verdoppelung ihrer Budgets bis 2007 rechnen. Es braucht also niemanden zu wundern, dass deutsche Spitzenforscher wie etwa Wolfgang Ketterle, Physik-Nobelpreistäger des Jahres 2001, lieber in den USA arbeiten. Zumal sich die Gehälter dort nicht an den Stufen des Bundesangestelltentarifs, sondern am Markt orientieren. Und der bietet den weltweit begehrten Spitzenforschern einiges mehr.

Peter Gruss, der neue Präsident der Max-Planck-Gesellschaft, stellt hierzu fest: „Wenn wir einem Amerikaner nur die Hälfte des Gehalts bieten können, das er in den USA erhält, muss er schon Idealist sein, um trotzdem zu uns zu kommen.“ Ganz zu schweigen von der lähmenden Bürokratie im deutschen Forschungsbetrieb. Darin sind wir, wie sein Amtsvorgänger Hubert Markl drastisch qualifiziert, „Weltmeister aller Klassen …, unschlagbar in der Vielfachselbstbehinderung“.

Jetzt wird für den Forschungsstandort Deutschland geworben. Eine undankbare Aufgabe, solange das Problem der leistungsorientierten Gehälter und einer radikalen Entbürokratisierung nicht politisch gelöst ist. Eine Initiative mit dem wuchtigen Titel „Internationales Marketing für den Bildungs- und Forschungsstandort Deutschland“ soll es richten. Getragen wird sie von der Bund-Länder-Kommission und den großen Organisationen in Forschung, Wirtschaft und Politik. Mit allen in den Ländern vertretenen Parteien hat sie zum Ziel, den Bildungs- und Forschungsstandort Deutschland international attraktiver zu machen. So deutlich das vereinte Bekenntnis – so eindeutig belegt die Marketinginitiative freilich die allseits geteilte Erkenntnis: Hier besteht Handlungsbedarf.

Was tun? Großprojekte sind probate Instrumente. Neben dem eigentlichen Zweck, nämlich Talente anzuziehen und die angestrebten Resultate zu erbringen, entfachen sie in der Regel auch weitere dynamische Prozesse. Doch bei manchem Großprojekt, das wie ein Kristallisationskeim für die Forschung wirken könnte, endet der Konsens der Demokraten am Horizont der Parteilinie. Das führt zu Blockaden.

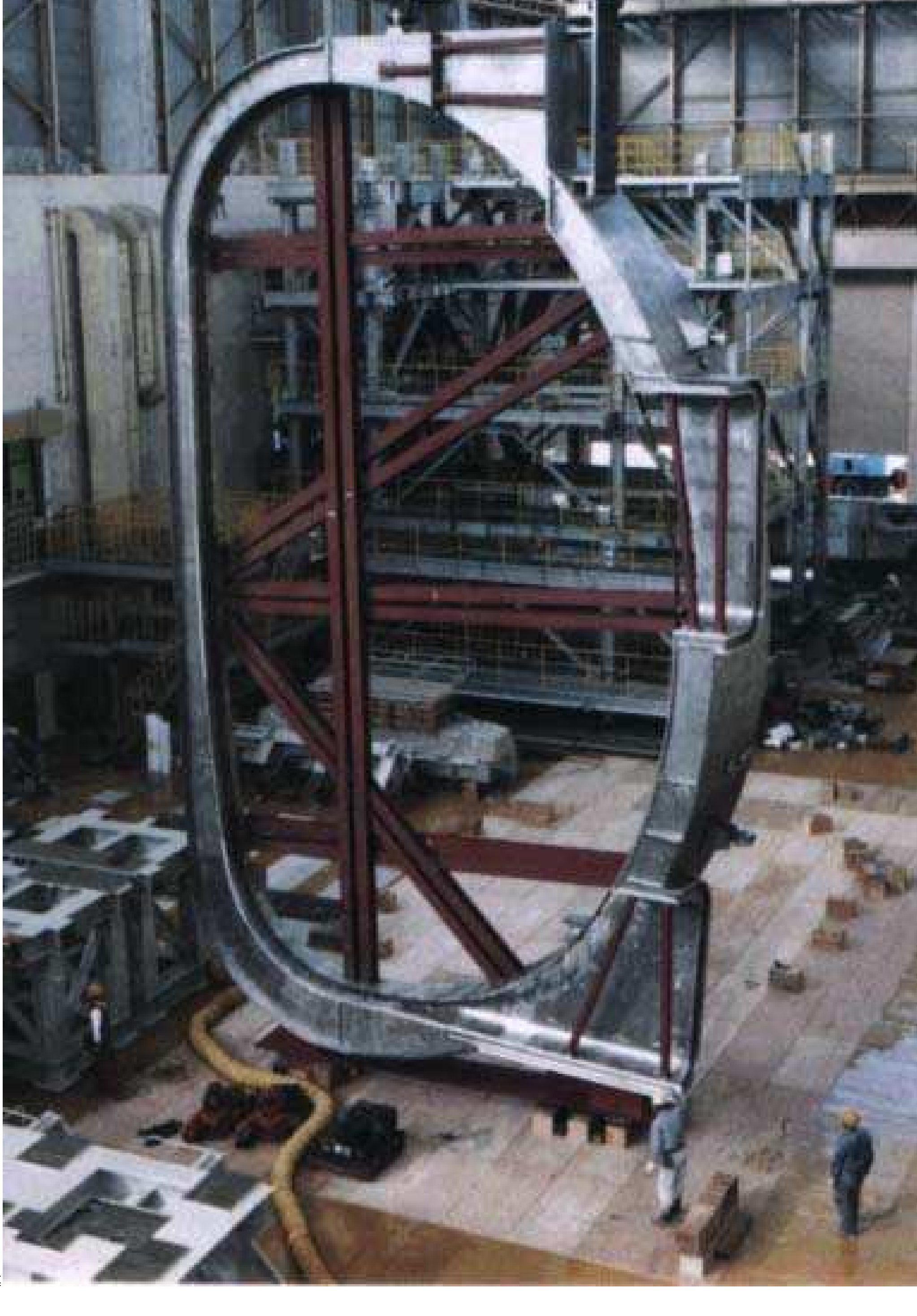
Eklatantes Beispiel hierfür ist die Fusionsforschung. Seit mehr als fünfzig Jahren gilt die Kernfusion als Energiequelle der Zukunft – und wird es vielleicht auch für immer bleiben. Denn noch immer ist alles andere als gewiss, ob Fusionskraftwerke jemals zu unserer Stromversorgung beitragen können. Der Internationale Thermonukleare Experimentalreaktor, abgekürzt Iter, soll zeigen, ob diese Kohlendioxid-neutrale und nachhaltig mit Wasserstoff zu betreibende Anlage einen Teil der künftig benötigten Energie wirtschaftlich beisteuern kann. Nach Einschätzung von Alexander Bradshaw, Direktor am Max-Planck-Institut für Plasmaphysik in Garching bei München, könnten kommerzielle Fusionskraftwerke in rund fünfzig Jahren in Betrieb gehen.

Voraussetzung dazu ist allerdings die praktische Bewährung von Iter. Über dessen Sein oder Nichtsein – und somit wohl über die grundsätzliche Möglichkeit einer neuartigen Energiequelle für künftige Generationen – wird in wenigen Monaten unter den Teilnehmern entschieden: Dies sind die Staaten der Europäischen Union, die Russische Föderation, Kanada, die Schweiz und Japan. Die USA haben sich bereits 1998 gegen eine Beteiligung ausgesprochen. Die mittlerweile fast typisch amerikanische Begründung für den Ausstieg: Weder sei mit einem Energie-Engpass noch mit einem Treibhauseffekt aufgrund des von Menschen verursachten Kohlendioxid-Ausstoßes zu rechnen. Wegen des Rückzugs der USA musste das auf ursprünglich 8 Milliarden Dollar veranschlagte Iter-Projekt auf eine Light-Version abgespeckt werden (siehe „Der nächste Schritt zum Fusionskraftwerk“, Spektrum der Wissenschaft 06/2000, S. 86). Diese ist auf 3,5 Milliarden Euro taxiert. Deutschland soll hiervon den größten Anteil übernehmen.

Mit der Bundestagswahl am 22. September wird vermutlich eine wichtige Vorentscheidung zu Iter fallen, denn unterschiedlicher als zu diesem Großforschungsprojekt können Parteipositionen kaum sein:

CDU/CSU: „Die kontrollierte Kernfusion könnte die entscheidende Option für eine nachhaltige, sichere und verträgliche Energiequelle ab der zweiten Hälfte des Jahrhunderts sein“, so Martin Mayer, bildungs- und forschungspolitischer Sprecher der CSU-Fraktion.

Das eindeutige Bekenntnis zur Kernfusion wird noch untermauert durch die Forderung, dass Iter, wenn schon nicht am favorisierten Standort Greifswald an der Ostseeküste, dann zumindest in einem europäischen Nachbarland errichtet werden solle.



IPP

In einer Machbarkeitsstudie bauten japanische Firmen dieses zwanzig Meter hohe Segment des Iter-Vakuumtanks mit einer Maßgenauigkeit von drei Millimetern.

FDP: Auch die Freien Demokraten sprechen sich für den Iter-Standort Deutschland aus. Für sie „muss an der politischen Option Kernfusion für eine zukünftige Energieversorgung festgehalten werden“, wie es der FDP-Antrag zum Experimentierreaktor vom 13. März 2002 formuliert.

BÜNDNIS 90/DIE GRÜNEN: Wenig überraschend ist die klare Ablehnung der Bündnisgrünen. Für deren forschungspolitischen Sprecher Hans-Josef Fell ist die Kernfusion eine „Fehlinvestition in Milliardenhöhe“ und „riskant, teuer, überflüssig“ sowie „ein ungedeckter Scheck auf die Zukunft“.

Eine Haltung, welche die zögerliche Position des Koalitionspartners SPD erklären mag.

SPD: Als einzige der Parteien zeigen sich die Sozialdemokraten in der Frage Iter unentschieden. Nach Angabe von Werner Richter von der forschungspolitischen Arbeitsgruppe der SPD-Bundestagsfraktion bestünden noch Zweifel an der Wirtschaftlichkeit der Kernfusion. ▶


NASA

Sparzwänge könnten dazu führen, dass Astronauten nur noch den Betrieb der Internationalen Raumstation ISS aufrechterhalten, aber nicht mehr darin forschen können.

Diese würden beseitigt, wenn sich etwa ein Unternehmen der Energiewirtschaft an dem Projekt massiv wirtschaftlich beteilige.

PDS: Mit der Partei des demokratischen Sozialismus ist Iter nicht zu machen. Sie hält die Kosten und Sicherheitsfragen für ungelöst: „All diese und weitere Bedenken sind für uns Grund genug, der Kernfusion höchst kritisch gegenüberzustehen und einen mittelfristigen Ausstieg aus der Forschung anzustreben", so Angela Marquardt im Bericht des Ausschusses für Bildung, Forschung und Technologiefolgeabschätzung im Juni vor dem Deutschen Bundestag.

Hier dürfte das politisch heikle, weil emotional vorbelastete Wort „Kern" in der Kernfusionsforschung Abneigungen im Lager und Umfeld der Kernkraftgegner wecken und dafür sorgen, dass feste, konträre Positionen bezogen werden.

Allerdings ist es angesichts des beschlossenen Ausstiegs aus der Kernenergie durch die rot-grüne Regierungskoalition höchst erstaunlich, dass alle Fraktionen Forschungen zur Kernkraft und zur Sicherheit von Kernkraftwerken einhellig begrüßen. Das Argument: Während der Ausstiegsphase und danach sollen deutsche Wissenschaftler weiter in Sicherheitsfragen kompetent bleiben und international mitreden können.

Teilt die Raumstation das Schicksal des Cargolifters?

Auch in punkto Weltraumforschung und anderen Großprojekten sind die Positionen der Parteien nicht sonderlich weit voneinander entfernt. Es gibt eben keine fundamentale liberale, soziale, christdemokratische oder grüne Position zu Nanotechnologie, zur Grundlagenforschung in der Teilchenphysik, zu Weltraumteleskopen. Diese Forschungszweige werden einhellig begrüßt. Ohnehin sind die meisten Großprojekte in diesen Bereichen in internationalen Rahmen eingebunden und durch langfristige Verträge gesichert. Regierungswechsel werden daran nichts ändern. Unliebsame Überraschungen drohen indes durch Fehlkalkulationen und Budget-Überschreitungen, wie der Fall der Internationalen Raumstation ISS auf drastische Weise zeigt.

Besonders betroffen davon sind die wichtigsten Nutzungsmöglichkeiten der Raumstation: langfristige Mikrogravitations-Forschungsprojekte im Orbit. Heftige Erdenschwere holt sie unsanft auf den Boden der Tatsachen zurück. Kostenüberschreitungen der Nasa beim Aufbau der ISS in Höhe von 4,8 Milliarden Dollar haben den US-Senat und den Präsidenten George W. Bush auf die Bremse treten lassen. Zudem liegt das Volumen industriefinanzierter Forschungsaufträge in der Station weit hinter den Erwartungen. Das geplante Wohnmodul auf der Raumstation fiel nun Sparmaßnahmen zum Opfer. Damit werden sich auch künftig nur drei Astronauten – und nicht, wie ursprünglich vorgesehen, sechs bis sieben – permanent auf der Raumstation aufhalten können.

Doch damit, so sagen Kritiker, steht der Sinn des teuren Unternehmens insgesamt in Frage. Denn zwei Personen sind mit dem Management der Station von den Ausmaßen eines Containerschiffs bereits im Normalbetrieb voll ausgelastet. Gibt es Pannen zu beheben, wird auch noch das weitere Händepaar gefordert. Die ISS wäre dann vielleicht in punkto Psychologie erkenntnisträchtig. Nicht so sehr hingegen in den projektierten umfangreichen Forschungsprogrammen beispielsweise über das Verhalten von Kristallen und Werkstoffen im Zustand minimaler Gravitation.

Folgt also die Raumstation – auf höherem Niveau – dem Schicksal des Cargolifters? Die 14 beteiligten Nationen sehen angesichts des Platzmangels ihre eigenen Missionen und somit den Sinn ihres Engagements in Frage gestellt. Mit einem Anteil von 1,1 Milliarden Euro trägt Deutschland die Hauptlast unter den nichtamerikanischen Projektpartnern. Aufgrund der prekären finanziellen Situation der Nasa sperrten die europäischen Forschungsminister auf der jüngsten Ratstagung der Europäischen Raumfahrtbehörde Esa in Edinburgh sechzig Prozent der für die ISS-Forschung vorgesehenen Mittel.

Die Situation ist konfliktträchtig – doch in diesem und anderen internationalen Großprojekten, die über mehrere Legislaturperioden laufen, herrscht weitgehend Einigkeit in unserer Parteienlandschaft. Raumfahrt ist einfach so schick, dass sich fast alle dazu bekennen. Sogar die eher durch Hightech-Skeptizismus ausgezeichneten Bündnisgrünen mögen nicht so richtig dagegen sein. Denn mit an Bord ist für die Grünen ein Projekt zur Optimierung von Solarkollektoren im schwerelosen Raum. Und für die PDS ist trotz einiger Kritik durch PDS-Sprecher („Rot-Grünes Prestigeprojekt“) die Teilnahme der einst führenden Raumfahrtnation Russland an der ISS offenbar Grund genug, nicht weiter zu opponieren.

Am Firmament wird sich die Sache also schon richten, weil sich auf Erden alle einig sind. „Die Deutschen lieben Astrophysik und Kosmologie – weil sie den Alltag nicht verändern“, sagt Hubert Markl. Doch wenn es um Gentechnik, Kernfusion und andere brisante Themen geht, bläst der Forschung der von Bedenkenträgern entfachte kalte Wind ins Gesicht. Statt Offenheit und Zuversicht, verbunden mit einer gesunden Skepsis, dominieren heute Vorurteile und Misstrauen das öffentliche Meinungsbild.

„Ein Klima der Unvernunft“ nannte Englands Premier Tony Blair kürzlich die verbreitete technologiefeindliche Haltung, die einige europäische Forschungsstandorte lähmt. An Börsen wird auf die sensible Psychologie der Märkte Rücksicht genommen. Kritik und düstere Prognosen haben noch keinen Aufschwung zuwege gebracht, weiß man hier schon länger. Wie es scheint, hat sich noch nicht die Erkenntnis durchgesetzt, dass dies auch für die Forschung gilt. ■

Claus M. Schmidt *ist Wissenschaftsjournalist und Mitinhaber des Medienbüros* Correspondence *in München.*

WISSENSCHAFTSMANAGEMENT

Effektiv managen – effizient forschen

Geeignete Rahmenbedingungen könnten dazu beitragen, bewährte Managementstrukturen und Qualitätskriterien auch an Hochschulen und Forschungsinstituten einzuführen.

Von Ulrich Finkenzeller

Es gibt Wahrheiten in der Welt, die man nicht in Lehrbüchern findet, und es gibt Wahrheiten in Lehrbüchern, die man nicht in der Welt findet", meinte der Göttinger Physikprofessor und Philosoph Georg Christoph Lichtenberg zur Zeit der französischen Revolution. Auch heute ist die Kluft zwischen den Wahrheiten in der Betriebswirtschaft einerseits und den Türmen der Hochschulen und Forschungsinstitute andererseits in manchen Bereichen sehr groß.

Wissenschaftlicher Fortschritt kommt nicht von alleine: Professionalität, Verfügbarkeit von Mitteln, Bereitschaft zum Risiko, Tradition und jahrelange Erfahrung sind wichtige Attribute für den Erfolg. Das gilt für die Großforschung in besonderem Maße. Das in solchen Projekten erreichte Niveau ist auch stets ein Spiegel der wissenschaftlichen und kulturellen Leistungsfähigkeit der gesamten Gesellschaft.

Ein gutes Beispiel sind die Weltraumwissenschaften. Nationen, die sich hier engagierten, hatten nicht nur ein Stück Kultur gepflegt, sondern durch Beobachtung, Analyse und Anwendung neuer Ergebnisse mathematische, naturwissenschaftliche oder geografische Erkenntnisse gewinnen können. Durch das Vorliegen entsprechender Rahmenbedingungen erlebten auf diese Weise Frankreich um das Jahr 1800, England um 1850, Deutschland nach 1900 und die USA nach 1950 ihre wissenschaftliche Blütezeit. Und am Schluss zählt weniger die Flagge auf dem Mond als die Beherrschung der metergenauen zivilen und militärischen Navigation zu Lande, zu Wasser und in der Luft durch die Satellitentechnik.

Für eine effiziente und effektive innovations- und wissenschaftsfreundliche Kultur sind spezielle Rahmenbedingungen erforderlich. Welche Vorgaben sollte eine Regierung heute, zu Anfang des dritten Jahrtausends, hierfür beachten? Meiner Meinung nach die gleichen Vorgehensweisen, die sich in großen Kulturen, Nationen oder erfolgreichen Unternehmungen bewährt haben. Dabei sind immer vier aufeinander folgende Phasen zu bewältigen: Vision, Konzeption, Finanzierung und Umsetzung.

Vision. Die „Leitung" – also die Person oder Organisation, die über den Einsatz der Mittel entscheiden kann – entwickelt eine Vision und formuliert messbare Ziele. Etwa: „Bis zum Jahre 2010 ist Deutschland der anerkannte Führer in der Erfassung, Archivierung und Analyse aller frei verfügbaren zivilen geo- und weltraumwissenschaftlichen Daten aus nationalen und internationalen Quellen." Für die Umsetzung einer Vision sind Maßnahmen zu beschreiben (die „Strategie") und Mittel bereitzustellen.

Konzeption. Die Regierung schafft die notwendigen gesellschafts- und wissenschaftspolitischen Rahmenbedingungen auf nationaler und europäischer Ebene. Fast alle großen Erfolge der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts hatten ihre Wurzeln in der gewollten und staatlich geförderten Zusammenarbeit von Hochschulen, privaten und staatlichen

KOMMENTAR

Technologietransfer in Nöten

Haben Sie schon einmal Ihr Handy nach Ihrem Kontostand gefragt? Noch würden Sie da auf taube Ohren stoßen. Doch verbesserte Spracherkennung, -verarbeitung und -ausgabe, Biometrie und Übertragungstechnik im Internet werden das Mobiltelefon irgendwann zum eloquenten, vertrauenswürdigen und allwissenden Gesprächspartner machen. Dafür brauchen Sie dann kein spezielles Gerät mehr. Vielmehr sprechen Sie in das Mikrofon Ihrer Uhr, das System antwortet über die Lautsprecher in Ihren Brillenbügeln, und die Kontobewegungen erscheinen in Ihrer halbtransparenten Brille. Ähnliche Umwälzungen sind auch von der Gentechnik, Nanotechnik und Robotik zu erwarten.

„Womit erwirtschaften wir das Bruttosozialprodukt 2027?" Diese Frage bewegt die Bevölkerung der USA. Denn nach dortigem Empfinden berührt Wissenschaft auch unmittelbar die nationale Sicherheit. Deshalb will die US-Regierung ihren Forschungsetat bis 2010 auf 160 Milliarden Dollar verdoppeln – mit dem erklärten Ziel, die Zukunftsindustrien weltweit zu dominieren.

Unsere Wettbewerbsfähigkeit hingegen nimmt bei forschungsintensiven Gütern seit zehn Jahren ab. Schuld daran haben nicht nur die mangelnden Investitionen hierzulande: Konkrete Forschungsziele und davon abgeleitete Strategien sind weit und breit nicht erkennbar. Auch die Kommunikation der politisch Verantwortlichen mit der Wissenschaft und der Industrie verläuft in Deutschland anders. Während der US-Präsident von Spitzenforschern und -ökonomen beraten wird, befindet sich die Forschungsministerin Bulmahn mit 1500 „Nichtwissenschaftlern" im Forschungsdialog „Futur". Es geht bei diesen Gesprächen nicht um Forschungsinhalte, sondern darum, „was die Gesellschaft bewegt". Ein Beispiel ist die „Vorausschauende Planung und Gestaltung lebenswerter Arbeit in der Wissensgesellschaft". Uns fehlen rund acht Millionen Arbeitsplätze, und nun soll das, was fehlt, mit Steuergeldern menschlich gestaltet werden?

Kritik verdient vor allem die „Vermarktung" der Wissenschaften. Für InnoRegio – einen ostdeutschen Wettbewerb des Bundesforschungsministeriums – stehen bis 2006 nicht weniger als eine viertel Milliarde Euro zur Verfügung. Doch die Öffentlichkeitsarbeit dafür wirkt jämmerlich unprofessionell. Es gibt weder Medienpartner noch eine Medienresonanz. Stattdessen gibt man Geld aus für Begleitforschung, die inzwischen zwanzig Megabyte große Berichte produziert hat. Die Folge: InnoRegio ist heute allenfalls Insidern bekannt. Und dabei wäre eine Aufbruchstimmung gerade für Ostdeutschland so wichtig.

Joachim Jakobs ist PR-Berater und vorwiegend im Bereich Wissenschaft und Forschung tätig.

Instituten, geförderten Industrieprojekten oder sicherheitspolitisch motivierten Interessen. Hierzu gehört auch eine gesellschaftlich und arbeitsrechtlich mögliche und akzeptierte Mobilität von Spezialisten zwischen diesen Bereichen.

Für Deutschland könnte dies bedeuten: wirksame Einsetzung und Lenkung von Verbundprojekten, an denen gemeinsam Universitäten, Institute der wissenschaftlich orientierten Max-Planck-Gesellschaft und der industriell ausgerichteten Fraunhofer-Gesellschaft sowie Unternehmen der Luft- und Raumfahrtindustrie teilnehmen – und nicht jeder sein eigenes Süppchen kocht. Anstelle eines zahn- und mittellosen Bundesforschungsministeriums sind auch andere Ministerien oder Institutionen aus anderen Umfeldern einzubinden. Warum haben wir in Deutschland nichts Entsprechendes zur *Defense Advanced Research Projects Agency* (Darpa) des US-amerikanischen Verteidigungsministeriums, die nach außen durchaus offen ist, und die wesentliche technologische Beiträge zur Grundlagen-, angewandten oder missionsorientierten Forschung geleistet hat?

Finanzierung. Die gegenwärtigen Bundes- und Länderhaushalte für Forschung decken zum wesentlichen Teil feste Kosten ab, die nicht mehr zur Disposition stehen. Mit Ausgaben durch ausschließlich öffentliche Mittel von 0,77 Prozent des Bruttoinlandsproduktes im Jahr 2000 für Forschungs- und Entwicklungsaufwendungen liegt Deutschland im internationalen Vergleich erst an vierter Stelle nach Schweden (0,93 Prozent), Finnland (0,88 Prozent) und Frankreich (0,80 Prozent).

Die Landschaft alternativer und kreativer neuer Finanzierungskonzepte neben der langfristigen staatlichen Grundbeihilfe ist in Deutschland unterentwickelt. Hier kann an die einfachere Bereitstellung von Risikokapital und die Schaffung neuer steuerlicher Anreize für Forschungsförderung durch die Industrie oder durch Stiftungen gedacht werden. Wenn es in den USA ein nach den Stiftern benanntes „Keck"-Teleskop und ein Mount-„Wilson"-Observatorium gibt – warum nicht den „Quandt"-Satelliten mit einem „Infineon"-Detektor am „SAP"-Teleskop in Deutschland? Und was ist falsch an der Überlegung, dass auch im öffentlichen Dienst professionelle „Fund-Raiser" gegen Vergütung das tun, was ganze Stabsstellen großer Unternehmungen schon seit langem praktizieren, nämlich hauptamtlich sich Gelder aus allen zugänglichen Quellen beschaffen? ▶

Umsetzung. Notwendig ist eine dauerhafte Etablierung von Managementwissen im Forschungsumfeld. Brillante Wissenschaftler und kreative Denker erweisen sich nicht notwendigerweise auch als gute Manager von Personal, Ressourcen und Programmen. Hier sind konkret nachweisbare Qualifikationen von Führungskräften in der Wissenschaft gefragt.

Forschungsprojekte bleiben leider oft gut gemeinte, aber mit niedrigem Wirkungsgrad geführte Einzelinitiativen. Zumindest wenn sie ohne Projektmanagement-Techniken durchgeführt werden, ohne Werkzeuge zur Lenkung von mehreren Projekten, ohne Kenntnisse um Patente, Kauf, Tausch und Verkauf von geistigem, kommerziell verwertbarem Eigentum oder ohne effiziente Aufbau- und Ablauforganisation in Anlehnung an bewährte internationale Vorgaben (zum Beispiel an die Management-Norm ISO 9001 oder an die so genannte *Balanced Scorecard*, die einen ausgewogenen Satz von Zielkennzahlen definiert).



Deutschland hat zwar einen Wissenschaftsrat, der die Regierungen von Bund und Ländern zu Fragen der inhaltlichen und strukturellen Entwicklung von Hochschulen, der Wissenschaft und der Forschung berät. Aber warum sollte es nicht auch einen – neu zu schaffenden – „Bundesforschungshof“ geben? Eine solche Institution könnte, ähnlich wie der Bundesrechnungshof, regelmäßig oder auf Stichprobenbasis bewerten, ob in den Forschungseinrichtungen folgende Rahmenbedingungen vorhanden sind:

NACHGEHAKT

Wie Forscher zu Betrügern werden

Spektrum der Wissenschaft berichtete im September 1999, „völlig unerwartet“ sei es am kalifornischen Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) erstmals gelungen, einige Atome der superschweren Elemente mit den Ordnungszahlen 116 und 118 zu synthetisieren. Erst jetzt stellt sich heraus, wie begründet die Überraschung der Fachwelt war: Die für den vermeintlichen Nachweis der künstlichen Elemente entscheidenden Daten waren gefälscht worden; den mutmaßlichen Täter, Victor Ninov, hat das LBNL inzwischen entlassen.

Derselbe Forscher hatte zuvor bei der Gesellschaft für Schwerionenforschung (GSI) in Darmstadt an der Synthese der Elemente 110 und 112 mitgewirkt. Durch den Skandal in Berkeley misstrauisch geworden, fanden die Wissenschaftler in Darmstadt jetzt bei erneuter Nachprüfung heraus, dass er offensichtlich auch bei ihnen Daten manipuliert hatte – allerdings seinerzeit nur, um echte Befunde, die weiterhin Bestand haben, durch Hinzuerfinden passender Resultate zu „schönen“. Offenbar ging der mutmaßliche Betrüger erst in Berkeley so weit, die Daten zum Nachweis neuer Elemente komplett zu fingieren.

Die Forscherkollegen sind fassungslos: Was trieb den Täter, ihr Vertrauen so zu missbrauchen? Welchen Sinn konnte er in einem erschlichenen Triumph sehen, der unweigerlich mit dem Ruin seiner wissenschaftlichen Laufbahn enden musste?

Beim Versuch einer Antwort fallen Parallelen mit anderen Affären der letzten Zeit auf: Die deutschen Krebsforscher Friedhelm Herrmann und Marion Brach fälschten Anfang der 1990er Jahre Daten in mindestens vier gemeinsamen Publikationen. Und gegen den scheinbar ungemein erfolgreichen Halbleiterforscher Jan Hendrik Schön läuft seit Mai dieses Jahres eine Untersuchung seiner Arbeit für die Bell Laboratories in Murray Hill (New Jersey) – denn in einigen Publikationen präsentierte der deutsche Jungstar identische Diagrammkurven zu ganz unterschiedlichen Problemstellungen.

Diesen und ähnlichen Fällen ist gemeinsam, dass der betreffende Wissenschaftler unter großem Erfolgsdruck auf ein Ziel losgeht, das ihm zum Greifen nahe scheint – und das sich immer wieder hinter komplizierten Apparaturen und zeitaufwendigen Nachweismethoden versteckt. Um am Ball zu bleiben, muss der Forscher fest an sein Ziel glauben und seine Methoden immer weiter verfeinern. Dabei kann es geschehen, dass sein Glaube sozusagen stärker wird als die vorliegenden Daten und er sie so zurechtbiegt, wie sie nach seiner Überzeugung sein müssten, wenn alles nur endlich seine Richtigkeit hätte.

Hinzu kommt, dass in der modernen Forschung komplizierte Apparate und Methoden eine derart entscheidende Rolle spielen, dass oft ein Einzelner eine Monopolstellung im erfolgreichen Umgang damit erwirbt. An der GSI und am LBNL war der unterdessen wohl überführte Fälscher für die computergestützte Datenauswertung allein zuständig; nur ihm trauten die Kollegen zu, das ersehnte Ereignis aus einer Flut störender Hintergrunddaten herauszulesen. Bell-Forscher Schön wiederum verteidigt sich gegen den Vorwurf, seine Resultate seien nicht reproduzierbar, mit dem Argument, nur er beherrsche eben den diffizilen Umgang mit den nanotechnologischen Geräten zur Herstellung seiner neuartigen Halbleiterschichten.

In solchen Fällen wird – zumindest auf kurze Sicht – das entscheidende Kriterium für wissenschaftliche Wahrheit in Frage gestellt: die Fähigkeit anderer Forscher, die Ergebnisse zu reproduzieren. Solange eine bestimmte Forschungsanstrengung an diesem prekären Punkt verharrt, bleibt der Gemeinschaft der Wissenschaftler und insbesondere dem

➤ eine deutlich formulierte Forschungspolitik mit messbaren Zielen,
➤ festgelegte Ablaufprozesse für die wichtigsten Tätigkeiten und langfristige Planungen,
➤ eine gelenkte Kommunikation innerhalb der Organisation und nach außen,
➤ sinnvolle Halte- und Freigabevorgaben im Rahmen von Projekten,
➤ eine Wahrnehmung der eigenen Leistungsfähigkeit durch andere oder wirksame Korrektur- und Vorbeugungsmaßnahmen gegen Risiken und Fehler.

„Auf dass die Wahrheiten der Welt auch in die Elfenbeintürme der Forschung und Verwaltung Einzug halten!“ Die Umsetzung dieser Erkenntnisse kommt für Lichtenberg zu spät, aber hoffentlich nicht für uns. ■

__Ulrich Finkenzeller__ ist promovierter Physiker und Unternehmensberater. Er hat in der industriellen Forschung gearbeitet und war in den 1980er Jahren als Research Fellow an der Universität von Kalifornien in Berkeley.

beteiligten Team gar nichts anderes übrig, als jedem einzelnen seiner Mitglieder fast blind zu vertrauen. Unter dem psychischen, finanziellen und zeitlichen Druck, mit den teuren Apparaten endlich Erfolge vorweisen zu können, kann daraus die Versuchung entstehen, den Weg zum ohnedies erwarteten Resultat abzukürzen. Dabei bleibt die Wahrheit auf der Strecke, wenn auch nicht für lange.

Bleibenden Schaden nimmt durch den Vertrauensbruch nicht „die“ Wissenschaft als solche, denn die erholt sich nach jedem Fall für gewöhnlich bald wieder. Dauerhaft beschädigt wird vielmehr das Ansehen der Wissenschaftler als Angehörige einer ganz besonderen Zunft: Mit jedem neuen Betrugsfall stehen sie in der Öffentlichkeit als Wesen da, die auch nicht besser sind als die üblichen Verdächtigen wie korrupte Politiker oder gedopte Spitzensportler. Unverzeihlich an den wissenschaftlichen Betrügereien ist, dass sie den Eindruck erwecken, nun könne man nicht einmal mehr den Leuten vertrauen, die sich der Wahrheitssuche verschrieben haben.



__Michael Springer__ ist promovierter Physiker und ständiger Mitarbeiter bei Spektrum der Wissenschaft.

Im Spiegelkabinett

von Richard Mischak

Paul, theoretischer Physiker und damit punktförmig, steht in einem quadratischen Raum mit einer Seitenlänge von sechs Metern. Er steht einen Meter von der hinteren Wand und zwei Meter von der rechten Wand entfernt. Alle vier Wände sind perfekt verspiegelt. Er möchte möglichst wenig punktförmige Blenden so aufstellen, dass er sich selbst nicht sehen kann.

Wohin stellt er die Blenden?

Schicken Sie Ihre Lösung in einem frankierten Brief oder auf einer Postkarte an Spektrum der Wissenschaft, Leserservice, Postfach 104840, D-69038 Heidelberg.

Unter den Einsendern der richtigen Lösung verlosen wir zehn Fraktal-Rucksäcke. Der Rechtsweg ist ausgeschlossen. Es werden alle Lösungen berücksichtigt, die bis Dienstag, 17. September 2002, eingehen.

Lösung zu „Jans Eselin“ (Juli 2002)

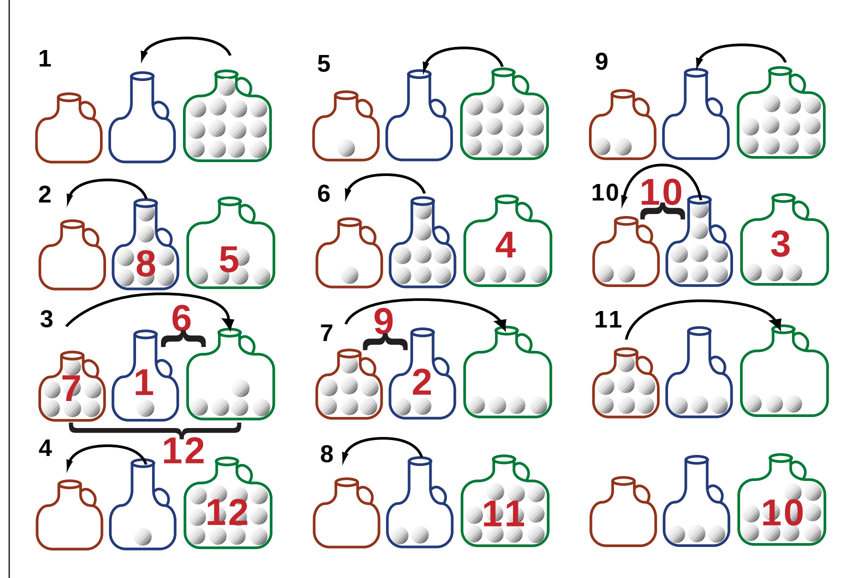
Jan packt seiner Eselin zwei leere Krüge mit einem Volumen von sieben und acht Litern sowie den vollen Krug mit 13 Liter Milch auf den Rücken. Dies ist die einzige Kombination, mit welcher Jan alle ganzzahligen Mengen zwischen einem und zwölf Litern abmessen kann.

Wie macht er das? Ein Universalverfahren ist unten abgebildet. Mit höchstens neun Umschüttungen stellt Jan jede gewünschte Menge bereit. Möglicherweise muss er das Gefäß, das Cleo zum Markt bringt, aus zwei verschiedenen Krügen befüllen.

Das Verfahren ist nicht immer das schnellste. So kann Jan sechs Liter in einem Zug abmessen, indem er zuerst den 7-Liter-Krug füllt.

Falls Cleo darauf besteht, aus nur einem Krug bedient zu werden, kann Jan auch das leisten, allerdings benötigt er für manche Mengen mehr Umschüttungen: mindestens elf, um zehn Liter im großen Krug zu behalten (siehe unten). Alle anderen Mengen lassen sich mit weniger Aufwand erreichen.

Die Gewinner der zehn Spektrum Jahresregister 2001 auf CD-Rom sind: Manfred Schunda, Traunstein; Anna Schmitz, Tübingen; Wolfgang Alb, Berlin; T. Haist, Stuttgart; Siegfried Reinwald, Kürten; Maria Dittrich, Sinsheim; Paul von der Heyde, Deensen; Matthias Simon, Bielefeld; Dieter Hablick, Bochum; und Hermann Bock, Darmstadt.

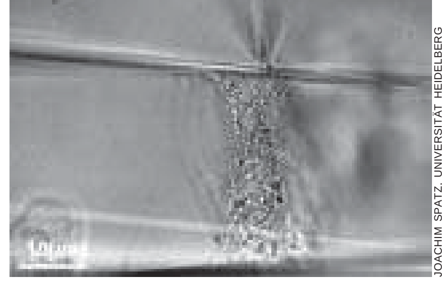


Lust auf noch mehr Rätsel? Unser Wissenschaftsportal wissenschaft-online (www.wissenschaft-online.de) bietet Ihnen unter dem Fachgebiet „Mathematik“ jeden Monat eine neue mathematische Knobelei.

ALFRIED KRUPP-FÖRDERPREIS

Zelle im Rampenlicht





JOACHIM SPATZ, UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Unter Zugzwang: Der Preisträger Joachim P. Spatz entwickelte ein Verfahren, mit dem eine Zelle zwischen zwei Mikroglasplatten gestreckt wird (rechts).

Professoren sind alt und grauhaarig – so das gängige Vorurteil. In dieses einfache Schema passt der Heidelberger Professor Joachim P. Spatz aber nicht. Mit seinen 32 Jahren erhielt er jetzt den mit je 500 000 Euro dotierten Alfried Krupp-Förderpreis 2002 zusammen mit zwei anderen jungen Preisträgern.

Spatz vereint am Institut für Biophysikalische Chemie drei Naturwissenschaften unter einem Dach. Schon während der Promotion an der Universität Ulm entwickelte er neuartige Methoden zur Nanostrukturierung. Diese erlauben Verständnis und Kontrolle der Selbstorganisation von synthetischen Polymeren auf Oberflächen, sodass die Darstellung von Strukturen bis in den Ein-Nanometer-Bereich möglich wird. Mit Beginn seiner Post-Doc-Zeit in Ulm und am Institut Curie in Paris begeisterte sich Spatz auch für biophysikalische Fragestellungen.

Zurzeit forscht er in zwei Bereichen: Zum einen untersucht seine Arbeitsgruppe die biochemische und mechanische Wechselwirkung von Zellen mit Substratoberflächen, zum anderen beschäftigt sein Team die Mikromechanik einzelner Zellen. Dafür wurden Experimente und Techniken entwickelt, mit denen sich die physikalischen Eigenschaften von Zellen und Zellmodellen untersuchen lassen. Bei einer Methode wird eine einzelne Gewebezelle zwischen zwei Mikroglasplatten gestreckt. Dadurch können viskoelastische Eigenschaften und Reaktionszeiten von Zellen auf äußere Störungen quantitativ erfasst und beschrieben werden. Zugleich kann das veränderte mechanische Verhalten von Krebszellen auf diese Weise erforscht werden.

So liefert Spatz' Arbeitsfeld für das Verständnis der Adhäsion, das „Ankleben" von Zellen an andere Zellen oder an ganze Gewebe, neue Erkenntnisse. Die Adhäsion ist ein lebensnotwendiger Vorgang, der unter anderem dem Austausch von Informationen dient. Daneben sorgt seine Forschung bei der mechanischen Wechselwirkung zwischen Zellen und Umgebung für mehr Klarheit. Der Anheftungspunkt einer Zelle, der so genannte fokale Kontakt, besteht aus einer sehr komplexen Ansammlung unterschiedlichster Proteine. Bei der Ausbildung eines solchen Kontakts kommt es zur Anhäufung von Transmembran-Rezeptoren (Integrine) in der Zellmembran. Der Arbeitsgruppe von Spatz gelang es in diesem Kontext zum ersten Mal, die Rezeptoraggregation in der Membran von Haut- und Knochenzellen durch den Kontakt mit nanostrukturierten Oberflächen zu kontrollieren. Künftig will Spatz auch anhand von Stammzellen untersuchen, wie sich Defekte in Zellen auf die Funktion von Organismen auswirken.

Der Alfried Krupp-Förderpreis ist eine der höchst dotierten Auszeichnungen für Nachwuchswissenschaftler. Er unterstützt junge Hochschullehrer der Natur- und Ingenieurwissenschaften, die aufgrund bestehender Stellenengpässe noch keinen Ruf auf eine C4-Professur erhalten haben. Die Krupp-Stiftung wurde 1967 vom letzten persönlichen Inhaber der Firma Friedrich Krupp, Dr. Alfried Krupp von Bohlen und Halbach, testamentarisch errichtet.

COMMUNICATOR-PREIS

Aus dem Elfenbeinturm in die Herzen der Menschen

Geforscht wird in der Regel hinter verschlossenen Türen. Nur wenige Wissenschaftler öffnen ihre Labors und erzählen der Öffentlichkeit anschaulich und verständlich von ihrer Arbeit. Der Münchner Physiker Wolfgang M. Heckl ist ein solcher Kommunikator: Er macht seit über zehn Jahren die Vorgänge im Nanokosmos für jedermann interessant. Dafür erhielt er jetzt den Communicator-Preis 2002.

Heckls Forschungsobjekte sind winzig: Mit dem Rastertunnelmikroskop untersucht er Atome und Moleküle, die er mit einem Rasterkraftmikroskop sogar manipulieren kann. So bohrte er auch das kleinste Loch der Welt aus nur einem fehlenden Atom in einer Kristalloberfläche, das ihm und seinem Mitarbeiter John Maddocks einen Eintrag im Guinness-Buch der Rekorde bescherte.

Sein Hauptinteresse gilt aber der Frage, wie das Leben entstanden ist. Um die Situation im Labor nachzustellen, tropft er Lösungen mit der Erbsubstanz DNA auf einen heißen Stein und beobachtet, wie die Moleküle untereinander in Verbindung treten.

Einen großen Teil seiner Zeit verwendet Heckl darauf, seine Arbeit Nichtwissenschaftlern nahe zu bringen. Dabei möchte er mit pädagogisch und wissenschaftlich anspruchsvollen Konzepten vor allem die Jugend ansprechen.

Heckl promovierte 1988 in Biophysik. Nach Forschungsaufenthalten in Toronto und in der Schweiz habilitierte er 1993 an der Ludwig-Maximilians-Universität München. Seither leitet er am Institut für Kristallographie und Angewandte Mineralogie eine Arbeitsgruppe im Bereich Nanowissenschaften.

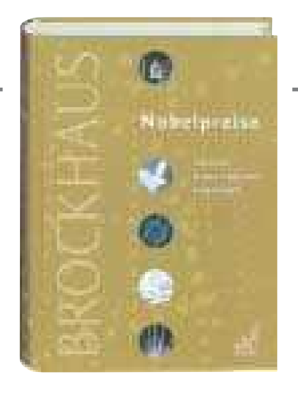
Der Communicator-Preis, eine persönliche Auszeichnung, die der Stifterverband für die Deutsche Wissenschaft erstmals 2000 verliehen hat, ist mit 50 000 Euro dotiert.



ABBILDUNGEN: WOLFGANG M. HECKL



Wolfgang Heckl mit Rasterkraftmikroskop (links) und eine Aufnahme von Trimesinsäure-Molekülen



WISSENSCHAFT ALLGEMEIN

Brockhaus-Redaktion (Hg.)

Der Brockhaus

Nobelpreise

Bibliographisches Institut, Mannheim 2001.
1056 Seiten, € 49,95

Zumindest was die Physik angeht, hat das Komitee, das alljährlich – mit bislang wenigen Unterbrechungen – den hoch dotierten und prestigeträchtigen Nobelpreis für überragende wissenschaftliche Leistungen vergibt, gute Arbeit geleistet. Einige Merkwürdigkeiten und Verspätungen sind als unvermeidlich anzusehen. So ist den Relativitätstheorien selbst niemals ein Nobelpreis zuerkannt worden, wohl weil sie dem Komitee nicht über alle Zweifel erhaben schienen; ersatzweise bekam 1921 der damals schon weltberühmte Albert Einstein den Physik-Preis „für seine Verdienste um die theoretische Physik, besonders für die Entdeckung des Gesetzes des photoelektrischen Effekts“. Erst 1980 konnte sich das Komitee dazu durchringen, die „Verletzungen fundamentaler Symmetrien beim Zerfall der neutralen Kaonen“, eine wahrlich fundamentale und überraschende Entdeckung von 1964, durch die Preisvergabe an James W. Cronin und Val L. Fitch zu würdigen. Und nach Auffassung der Gemeinde der Elementarteilchenphysiker steht für die Entdeckung der Quantenchromodynamik eine Auszeichnung seit Jahrzehnten aus.



Diese Porträtaufnahme (um 1863) zeigt den Preisstifter, den schwedischen Chemiker und Industriellen Alfred Nobel.

Aber von diesen und ähnlichen Mängeln abgesehen, geben die Leistungen der Nobelpreisträger – auch wenn sie gelegentlich mit dem Preis für Chemie geehrt wurden – im Wesentlichen schon die bedeutendsten Errungenschaften der Physik wieder, die uns das vergangene 20. Jahrhundert beschert hat (für die anderen Fachgebiete fühle ich mich nicht zuständig). Ein erläuterndes Lexikon dieser Leistungen könnte ein unübertreffliches Kompendium der durch sie bewirkten Fortschritte bilden.

Eine große Chance also. Doch wurde sie in diesem Buch genutzt?

Nicht optimal in dem Format, das der Verlag gewählt hat: Für jeden, auch geteilten Nobelpreis eines Jahres steht eine Doppelseite zur Verfügung. Das ist zu viel für den Nobelpreis des Jahres 1912 an den Schweden Nils Gustaf Dalén für „die Erfindung selbstwirkender Regulatoren“, die bei der Beleuchtung von Leuchttürmen und Leuchtbojen Anwendung finden, und zu wenig für den unter drei Forscher aufgeteilten Physik-Preis 1978. Eine Hälfte des Preises ging an den russischen Physiker Pjotr L. Kapiza „für seine grundlegenden Arbeiten auf dem Gebiet der Tieftemperaturphysik“, die andere Hälfte zu gleichen Teilen an die Amerikaner Arno A. Penzias und Robert W. Wilson „für die Entdeckung der kosmischen Mikrowellen-Hintergrundstrahlung“. Verschiedener können zusammen gewürdigte Leistungen nicht sein. Immerhin: Dem Autor der zugehörigen Doppelseite, dem Physiker und Wissenschaftshistoriker Michael Schaaf aus Kapstadt, ist es trotz des eingeschränkten Platzes gelungen, die Leistungen der drei Forscher sowohl darzustellen als auch geschichtlich einzuordnen.

Man soll ja nicht zu viel auf Titel geben. Aber in diesem Buch drängt sich eine Trennung der Autoren mit und ohne durch den Titel ausgewiesene Kompetenz geradezu auf. Die gut 110 Essays über die Nobelpreise für Physik und für Chemie, durch die Physiker geehrt wurden, sind insgesamt von nur 18 Autoren verfasst. Von ihnen sind bei großzügiger Auslegung 13 oder 14 durch ihre ausgewiesene Vorbildung qualifiziert, große Themen der Physik und/oder deren Geschichte darzustellen. Diese Autoren haben aber nur etwa die Hälfte dieser Essays geschrieben. Von den anderen stammen vierzig aus der Feder von Uwe Schulte, der im Autorenverzeichnis als „Dipl.-Ing. agr., Autor und freier Wissenschaftsjournalist mit Themenschwerpunkt Biotechnologie, Freiberg“ vorgestellt wird. Und siehe da: Unter den Artikeln der „qualifizierten“ Autoren finden sich alle vorzüglichen und keine schiefen oder gar falschen. Umgekehrt ist unter den übrigen Artikeln kein vorzüglicher, aber zahlreiche schiefe. Man lese nur die hoffnungslos misslungene Darstellung des Raman-Effektes, für dessen Entdeckung der indische Physiker Chandrasekhara Ventaka Raman den Physik-Nobelpreis des Jahres 1930 erhalten hat. Wie soll auch ein einziger Autor vierzig der wichtigsten Erfolge der Physik des vergangenen Jahrhunderts kompetent darstellen und geschichtlich einordnen können?

Das Personenregister ist lausig. Bei den Nobelpreisträgern beschränkt es sich mit wenigen Ausnahmen auf die Angabe der ihrem Preis gewidmeten Seiten. Immerhin wird vermerkt, dass Albert Einstein in dem Essay auftaucht, der von dem Physik-Nobelpreis des Jahres 1918 an Max Planck handelt, nicht aber, dass Niels Bohr auf derselben Seite genannt wird. Es fehlen zahlreiche in den Essays erwähnte Personen, die nicht Nobelpreisträger sind, wie Heinrich Hertz oder Arnold Sommerfeld, der im hervorragenden Essay zum Nobelpreis an Max von Laue (1914) mehrfach erwähnt wird.

Wegen zahlreicher Überschneidungen der durch Nobelpreise ausgezeichneten Forschungen hätte eine ordnende Hand die Beiträge koordinieren sollen. Die aber fehlt. Wiederholungen sind häufig; es gibt sogar einander widersprechende historische Einschätzungen. In ihrem hervorragenden Beitrag über den Chemie-Nobelpreis an Ernest Rutherford 1908 nennt Beate Ceranski zusammen



Für seine Arbeiten über die Hormone der Hypophyse (grün in diesem Falschfarben-Hirntomogramm) erhielt Bernardo Houssay 1947 den Medizin-Preis.

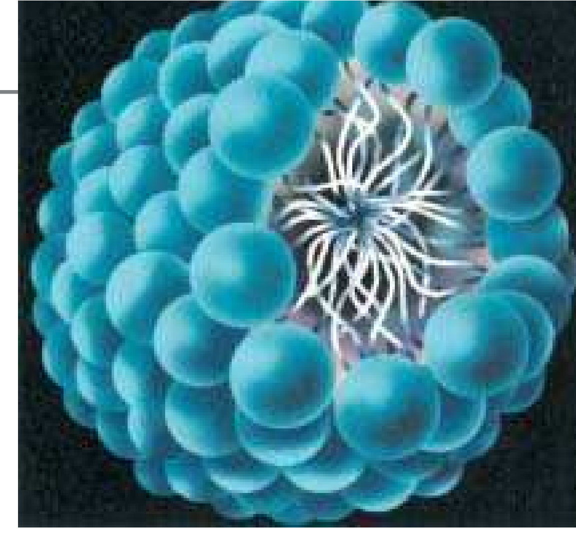
mit ihm auch seinen Mitarbeiter Hans Geiger. Üblich, wenn auch ungerecht ist es, nur Rutherford zu nennen. Diesen aber zu Gunsten von Geiger und deren gemeinsamem Adepten Ernest Marsden ganz fortzulassen, wie in dem Artikel zu dem Nobelpreis von 1990 an Jerome I. Friedman, Henry W. Kendall und Richard E. Taylor, zeugt von Unkenntnis oder gewollter Fehleinschätzung.

Eingeleitet wird der „Brockhaus der Nobelpreise" durch gelungene 29 Seiten Überblick über das Leben des Preisstifters Alfred Nobel, die Geschichte und gegenwärtige Vergabepraxis des Preises sowie über dessen Einfluss auf die Lebensumstände des deutschen Preisträgers von 1985, Klaus von Klitzing. Für meinen Geschmack nimmt allerdings Jutta Fölsing, die Autorin dieser Berichte, die Koketterien ihres Preisträgers zu oft zu ernst. Jedes Jahrzehnt wird durch eine Bildergalerie eingeleitet.

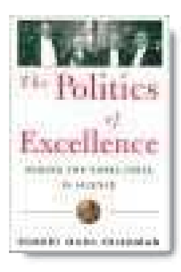
Insgesamt wurde eine Chance vertan; ein besseres Buch wäre möglich gewesen (und wäre auch jetzt noch – mit gründlicher Überarbeitung – aus dem vorhandenen Material zu machen). Doch für eine Orientierung über die Fortschritte der Physik im vergangenen Jahrhundert reicht auch dies, und besser als keins ist es allemal. So sei es unter Vorbehalten empfohlen.

Henning Genz

Der Rezensent ist Professor für Physik mit dem Arbeitsgebiet „Theorie der Elementarteilchen" am Institut für Theoretische Teilchenphysik der Universität Karlsruhe.



Struktur eines Kolloids aus hydrophilen Gruppen (Kugeln, außen) und hydrophoben, beweglichen Kohlenwasserstoffketten. Für „den Nachweis der heterogenen Natur kolloidaler Lösungen … " erhielt der Österreicher Richard Adolf Zsigmondy den Chemie-Nobelpreis 1925.



WISSENSCHAFTSPOLITIK

Robert Marc Friedman

The Politics of Excellence

Behind the Nobel Prize of Science

Freeman, New York 2001. 379 Seiten, $ 30,–

Was hat den größeren Einfluss darauf, wer den Nobelpreis bekommt: die wissenschaftliche Leistung des Kandidaten oder politisches Kalkül? Pünktlich zum hundertsten Geburtstag des Nobelpreises beleuchtet der amerikanische Wissenschaftshistoriker Robert Marc Friedman die Hintergründe der Preisverleihungen der ersten fünfzig Jahre, mit Schwerpunkt auf den Disziplinen Physik und Chemie. Mehr Unterlagen konnte der Autor nicht vom Staub der Zeit befreien, denn die Akten unterliegen einer Sperrfrist von einem halben Jahrhundert. Friedman folgt mit seinen Nachforschungen alter amerikanischer Tradition, die auf Wissenschaftsgeschichte seit jeher mehr Wert legt als die europäische.

Im ersten Kapitel beschreibt er minutiös, wie schwierig es war, das Testament des Stifters Alfred Nobel umzusetzen. Die Testamentsvollstrecker mussten zunächst gegen die Widerstände der Familie Nobel, der Königlichen Akademie und anderer Parteien ankämpfen. Die weiteren Kapitel konzentrieren sich exemplarisch auf strittige und häufig fragwürdige Entscheidungen des Nobelkomitees und der Akademie der ersten fünfzig Jahre. Es ist kaum einzusehen, dass der Schwede Nils Gustaf Dalén den Physik-Nobelpreis 1912 für seine Leuchtturm-Beleuchtungsregler (siehe die vorstehende Rezension) erhielt, während Lise Meitner, die gemeinsam mit Otto Hahn die Kernspaltung entdeckte, leer ausging.

Die Schwierigkeit, die Hintergründe der Entscheidungen ohne Zeitzeugen zu analysieren, hat Friedman mit einigen interessanten und plausiblen Hypothesen umgangen (allerdings neigt er dazu, hin und wieder moralisch in seinen Ausführungen zu werden). So behauptet er, dass zu Beginn des letzten Jahrhunderts schwedische Wissenschaftler durch die Ausbildung an deutschen Universitäten und auch durch den deutschen kulturellen Einfluss auf das schwedische Bürgertum eine Affinität für deutsche Kandidaten hatten. Einige Nominierungen spiegeln berufliche Präferenzen schwedischer Wissenschaftler wie zum Beispiel für Perfektionierungen von Messinstrumenten wider; einen fundamentalen Fortschritt sucht man in diesem Zusammenhang vergeblich. Oder Nationenproporz spielte eine Rolle: Charles G. Barkla (Physik 1917) war ein schwacher Kandidat: Er hatte zwar die „charakteristische Röntgenstrahlung von Elementen" entdeckt, die viel bedeutendere Interpretation hatten jedoch andere geleistet. Nur musste die britische Wissenschaft auch mal einen Preis abbekommen.

In der Kategorie Chemie wollten die Komiteemitglieder häufig ihre Doktorväter ehren, während nicht wenige ihrer Kollegen aus der Physik Schwierigkeiten hatten, die Forschungsergebnisse aus Quantenmechanik und Relativitätstheorie zu akzeptieren, geschweige denn zu verstehen.

Über einen anderen Fehler geht Friedman zu knapp hinweg: Enrico Fermi bekam den Physik-Preis 1938 unter anderem für die Erzeugung von Transuranen durch Beschuss von Uran-Atomkernen mit Neutronen. Wenig später stellte sich heraus, dass Fermi sich geirrt und statt dessen eine Kernspaltung beobachtet hatte.

Bemerkenswert und überraschend ist, dass gerade neue Mitglieder im Nobelkomitee viele steinige Wege freigeräumt haben. Auf ihre Initiative hin wurden überfällige Verleihungen und komiteeintern blockierte Nominierungen, zum Beispiel für Albert Einstein, Wolfgang ▶

(Seiten 108 bis 110: Anzeige und Beihefter)

Pauli, Walter Nernst und Otto Stern, auf den Weg gebracht.

Friedman zeichnet interne Konflikte und persönliche Auseinandersetzungen von Widersachern im Nobelkomitee und in der Akademie nach. Die Argumentationen um die Bedeutung wissenschaftlicher Entdeckungen und Erfindungen werden neu aufgerollt. Daneben diskutiert Friedman auch die Schwierigkeiten innerhalb des Komitees, die Physik von Teilgebieten wie Meteorologie und Astronomie sowie die Schwerpunkte in der Chemie voneinander abzugrenzen.

In den ersten fünfzig Jahren der Nobelpreisverleihungen erschütterten zwei Weltkriege die Menschheit. Die Zwischenkriegszeit war geprägt vom Boykott der deutschen Wissenschaft durch die alliierten Mächte, was für die Nobelstiftung eine große Herausforderung darstellte. Die Verleihung der Nobelpreise direkt nach dem Ersten Weltkrieg an Deutsche löste bei den alliierten Forschern und Medien Unmut aus. Friedman beschreibt detailliert die Verleihung an Fritz Haber, die auf Grund seiner Beiträge für die chemische Kriegsführung ein Politikum war.

Der Autor spart auch einen handfesten Skandal nicht aus: In den 1920er Jahren wurden etliche Preise verspätet oder gar nicht vergeben; der Zinsgewinn beziehungsweise das eingesparte Geld kam dem Fonds für schwedische Forschungsprojekte und damit einzelnen schwedischen Wissenschaftlern zugute.

Friedman bezweifelt auch, dass Ernest E. Lawrence den Physik-Preis 1939 für die Entdeckung und Weiterentwicklung des Zyklotrons wirklich verdient hat, und vermutet ein Geschäft auf Gegenseitigkeit. Immerhin bekam wenig später der Schwede Karl M. Siegbahn dank der Unterstützung von Lawrence sein Zyklotron und damit ein neues Arbeitsgebiet.

Das letzte Kapitel gibt einen Ausblick auf die Verleihungspolitik nach 1950, die von Lobbyismus und Forschungsförderung geprägt ist.

Das Buch bietet viele Hintergrundinformationen der Forschungsgeschichte, besonders auch der deutschen Forschungslandschaft. Meilensteine sind hier der Boykott der deutschen Wissenschaft durch die Alliierten, Unterschriftenlisten der deutschen Wissenschaftler zur Unterstützung der nationalen Anstrengungen im Ersten Weltkrieg, die Aktivitäten der Rockefeller Foundation und Hitlers Verbot für deutsche Wissenschaftler, Nobelpreise anzunehmen.

In Friedmans Buch fehlt leider eine wissenschaftliche Literaturliste im Anhang; Quellenangaben aus dem Archiv sind pro Buchseite jeweils in einem Absatz zusammengefasst. Das Buch bietet dennoch eine detaillierte, plausible und kritische Zusammenfassung der Nobelpreisgeschichte, welche in anderen Büchern so nicht zu finden ist.

Claus D. Hillebrand

Der Rezensent ist promovierter Physiker und arbeitet bei einem internationalen Technologiekonzern in Frankfurt am Main.

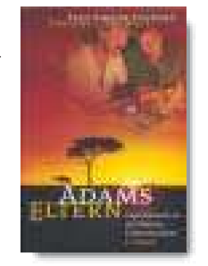
PALÄONTOLOGIE

Friedemann Schrenk und Timothy G. Bromage

Adams Eltern

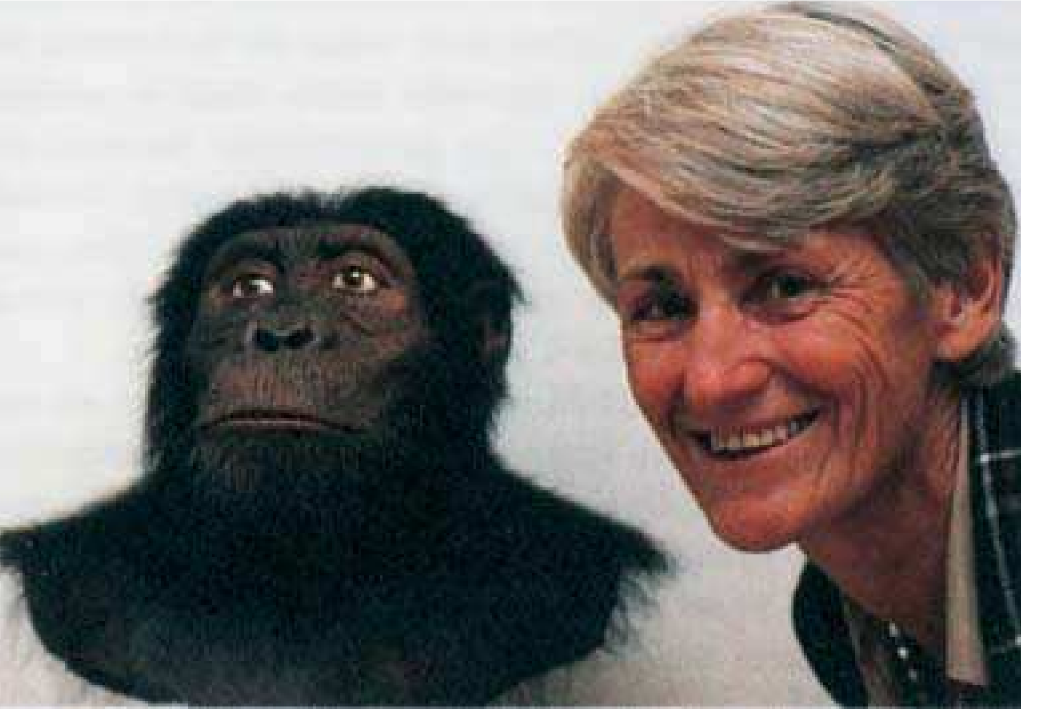
Expeditionen in die Welt der Frühmenschen

C.H. Beck, München 2002. 255 Seiten, € 19,90



Der Karriereweg von Friedemann Schrenk, der heute an der Universität Frankfurt Paläobiologie lehrt, begann schon in der Kindheit als Ammonitensammler auf der Schwäbischen Alb. Und auch Timothy Bromage, heute am Hunter College in New York tätig, war bereits als Zehnjähriger begeisterter Steinsammler und hatte zudem das Glück, in diesem zarten Alter Louis Leakey, den Senior der berühmten Prähistorikerfamilie, in einem Vortrag zu erleben. Während ihres Studiums gelangten beide nach Südafrika, wo ihre Freundschaft begann. Immer mehr reifte in ihnen der Wunsch, es ihren großen Idolen Richard Leakey (Sohn von Louis), Donald Johanson und Phillip Tobias nachzutun, die zahlreiche bedeutende Hominidenfunde gemacht hatten.

1982 beschlossen sie dann, tatsächlich nach fossilen Hominiden zu suchen. Aber wo? In Ost- und Südafrika waren bereits prominente Forschungsteams erfolgreich gewesen. Zwischen diesen beiden Regionen erstreckte sich ein 3000 Kilometer langer „Korridor“, der zwar bis dahin ohne Hominidenfunde war, aber durchaus aussichtsreich erschien. Damit war der Name „Hominid Corridor Research Project“ geboren; für die Suche wurde das Land Malawi gewählt. Von dort lag allerdings paläontologisch ▶



Meave Leakey mit einer Rekonstruktion des *Australopithecus anamensis*; ihre bekanntesten Funde sind Skelettteile dieses über vier Millionen Jahre alten Vormenschen.

nichts vor als eine Beschreibung wirbeltierhaltiger Sedimente von 1927.

Angetrieben von ihrem großen Traum, scheuten Schrenk und Bromage fortan keine Mühen, aber es vergingen noch etliche Jahre, bis ihr Traum in Erfüllung ging. Da der erhoffte Hominidenfund sich zunächst nicht einstellte, wurde es immer schwieriger, die erforderlichen Mittel für ein solches Feldforschungsvorhaben aufzutreiben. So mussten die gefundenen Schweine, Antilopen und anderen Wirbeltiere in den Vordergrund des Projektes gerückt werden – nicht zu Unrecht, denn sie würden wertvolle Hinweise auf die Lebensumwelt der Frühmenschen geben, wenn diese erst gefunden wären.

Auf den ersten Forschungsaufenthalt in Malawi 1983 folgten viele weitere. Schrenk und Bromage beschreiben das Paläontologenleben so anschaulich, dass man es fast nacherleben kann. Um ein großes Gelände systematisch abzusuchen, wird ein Camp errichtet. Schon vor 5 Uhr, bevor die ersten Hähne krähen, geht es hinaus zu den Fundschichten. Sechs Stunden lang durchstreift das Team das unwegsame Gelände und die bis zu fünfzig Meter tiefen Schluchten. Nachmittags werden die tierischen Fossilien ausgebreitet, gesichtet und gesäubert, bis gegen 17 Uhr die Nachtvorbereitungen beginnen und man Zeit zur Entspannung bei Cashewnusswein findet. Nebenbei erfährt der Leser, wie ohne die eigentlich nötigen Ingredienzien dieser „wohl köstlichste Fruchtwein aller Zeiten“ gebraut werden kann und welche kleinen Feuerwerke beim Rösten der Cashewnüsse entstehen.

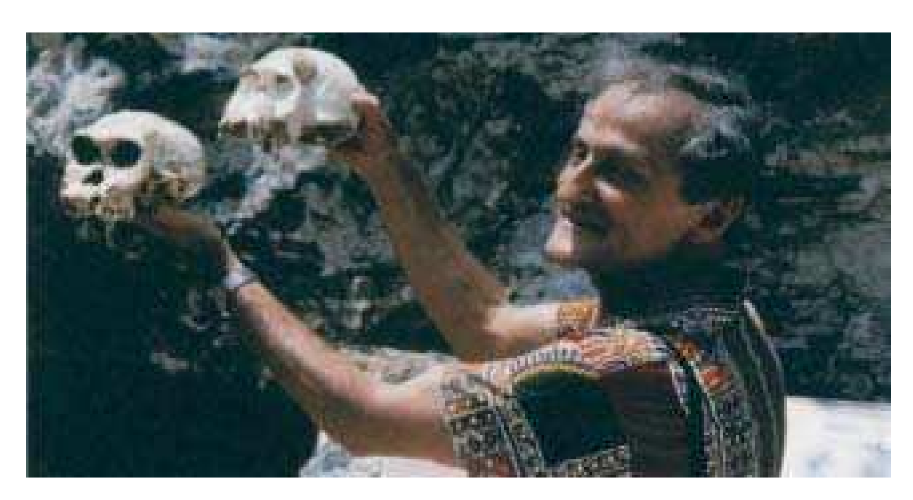
Neben der eigentlichen Arbeit müssen die Wissenschaftler zahllose lokale Führungspersonen wie Lehrer, Politiker und Mitarbeiter von Behörden vom Sinn eines solchen Projektes überzeugen, den Einheimischen die Sorge nehmen, man suche nach Leichen und alten Knochen ihrer Vorfahren. Überhaupt müssen sie ein Vertrauensverhältnis zur einheimischen Bevölkerung aufbauen, ja ganz in das traditionelle afrikanische Leben eintauchen – was durch Gastfreundschaft und Hilfsbereitschaft erwidert wird.

Nach jahrelanger Feldarbeit kommt dann doch noch der große Erfolg. Bromage berichtet, dass er an jenem Tag im August 1991 aufwachte und sich sicher war, heute einen Hominiden zu finden. Wie häufig suchte man den Boden an einer fossilreichen Stelle ab. Es kamen etliche Überreste von Antilopen zu Tage, dann eine Unterkieferhälfte, die zunächst noch kein Aufsehen erregte: Nach zehn Jahren vergeblicher Suche hatte sich Skepsis breitgemacht, just als man am Ziel seiner Träume angelangt war. Doch alsbald kam auch noch der zweite Teil des Kiefers zum Vorschein.

Das wichtige Ziel war erreicht, doch nun begann die rund zwei Jahre dauernde wissenschaftliche Analyse des 2,5 Millionen Jahre alten Fossils. Es stellte sich heraus, dass es zu der Art *Homo rudolfensis* gehört, die bereits durch etwas jüngere Schädel- und Kieferfunde vom Turkana-See in Kenia bekannt war. Bis heute haben die Forschungen in Nordmalawi nur noch einen weiteren Hominidenfund ans Licht gefördert, ein kleines, verwittertes Oberkieferfragment mit zwei Backenzähnen, das zu einem robusten Vormenschen gehört.

Neben dem langen spannenden Weg bis zur Entdeckung des Hominidenfundes berichtet das Buch auch von früheren Entdeckungsgeschichten, zeigt auf, warum gerade Schweinefossilien so wichtig sein können, und plädiert dafür, die Hominidenevolution in Verbindung mit Veränderungen des Klimas, der Umwelt und des Lebensraumes unserer Vorfahren zu sehen. Vor diesem Hintergrund entwickeln die Autoren ein Bild von den Wegen der Menschwerdung, das sowohl die neuesten Entdeckungen an der Wurzel der Hominiden wie auch schon länger bekannte Vor- und Frühmenschenarten bis hin zur Entstehung des modernen Menschen behandelt.

War die Entdeckungsgeschichte des Malawi-Kiefers bereits ein wahrer Kraftakt, so hält das letzte Kapitel des Buches fast noch eine Steigerung bereit. Es handelt von der Idee der Autoren, in dem 8000-Seelen-Ort Karonga in Nordmalawi, in dem einer Umfrage nach das Wort „Museum“ fast unbekannt war, ein „Cultural and Museum Center“ zu errichten, sowie ▶



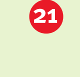
Phillip Tobias, der bekannteste Paläoanthropologe Südafrikas, hatte die Vermutung über den Hominidenkorridor geäußert, die der Fund der Autoren bestätigte.

5×5 Test® Sachbuch
Top Ten September 2002

Die Sachbuch-Rezensionen von wissenschaft-online (http://www.5x5test.de) enthalten eine Punktwertung: Für die Kriterien Inhalt, Vermittlung, Verständlichkeit, Lesespaß und Preis-Leistungsverhältnis vergibt der Rezensent jeweils bis zu fünf Punkte. Die Liste führt die zehn Bücher mit den höchsten Gesamtpunktzahlen auf (Erscheinungszeitraum der Rezensionen: 31. Mai bis 1. September 2002).

1. **K. Daumer, J. Vetter (Hg.)**
Wohin die Reise geht ...
Lebenswissenschaften im Dialog
Wiley-VCH, 114 Seiten, € 15,90


Punkte

2. **Gerhard Roth**
Fühlen, Denken, Handeln
Suhrkamp, 488 Seiten, € 29,80


3. **Rudolf Piechocki**
Die Zwergmaus
Westarp Wissenschaften, 126 Seiten, € 19,95


4. **Walter Kirchner**
Die Ameisen
Beck, 124 Seiten, € 7,50


5. **Richard P. Feynman**
Es ist so einfach
Vom Vergnügen, Dinge zu entdecken
Piper, 279 Seiten, € 22,90


6. **Rudolf Kippenhahn**
Amor und der Abstand zur Sonne
Piper, 186 Seiten, € 17,90
18

7. **Trevor Norton**
In unbekannte Tiefen
Taucher, Abenteurer, Pioniere
Rütten & Loening, 331 Seiten, € 20,00


8. **Richard Wollheim**
Emotionen
Eine Philosophie der Gefühle
C. H. Beck, 295 Seiten, € 25,90


9. **K. C. Cole**
Eine kurze Geschichte des Universums
Aufbau-Verlag, 308 Seiten, € 20,00


10. **Christian Ziegler**
Aufmerksamkeitsstörungen bei Kindern
Klett-Cotta, 237 Seiten, € 20,00


von dem schwierigen Weg bis zu dessen Realisierung.

Der Malawi-Kiefer ist ein weiterer bedeutender Mosaikstein in dem Riesenpuzzle zur Menschwerdung, das inzwischen Tausende von Funden und viele gut bekannte Arten umfasst. Sicher wird dies nicht der letzte Fund des engagierten Teams sein. Neben der wichtigen Jagd nach neuen Fossilien besteht der weitaus größte Teil paläoanthropologischer Forschungsarbeit aber in der oft ebenso spannenden Analyse der Hominidenfunde und in der Rekonstruktion der Menschwerdung. Ein Buch, das ohne Frage Begeisterung für dieses Fach weckt.

Günter Bräuer

Der Rezensent ist Professor am Institut für Humanbiologie der Universität Hamburg; er forscht seit mehr als zwanzig Jahren paläoanthropologisch in Afrika.

UNTERNEHMENSKULTUR

Gunter Dueck
E-Man
Die neuen virtuellen Herrscher
Springer, Heidelberg 2001. 283 Seiten, € 24,95



Was Gunter Dueck über die Denkweise in heutigen Großunternehmen erzählt, kann ich mühelos anhand eigener Erfahrung nachvollziehen. Die vielen seltsam anmutenden Beispiele stammen keineswegs nur aus seinem persönlichen Umfeld, sondern lassen sich in allen Firmen wiederfinden, die sich einer modernen Unternehmenskultur verpflichtet haben, also insbesondere in der Welt der so genannten Global Player.

Dem Autor geht es jedoch nicht vorrangig um das Erzählen von Geschichten, sondern darum, die Ursachen dieser teilweise skurrilen Begebenheiten aufzudecken. Dabei greift er weit in die Menschheitsgeschichte zurück: Sein Ausgangspunkt ist der Übergang von einer sporadisch aktiven Jägerkultur zu einer der Effizienz verpflichteten Bauernkultur, oder eben die Ablösung des Intuitiven und Sporadischen durch Logik und Ordnung. Mit diesem Wandel ist eine Änderung der in der Gesellschaft dominanten psychologischen Präferenzen verbunden. Wie schon in dem Vorgängerbuch „Wild Duck“ (besprochen in Spektrum der Wissenschaft 11/2000, S. 101) teilt Dueck die Menschen in Typen ein: diesmal in den ordnungswahrenden Citizen, den anpackenden Go West, den dem Tiefgründigen verbundenen Star Trek und den sinnsuchenden Blue Helmet.

Dueck beschreibt, wie das vorherrschende Bauerndenken im Bemühen, die vorhandenen Strukturen immer effizienter zu gestalten, in eine Sackgasse gerät. Vorangetrieben wird diese Entwicklung von den alles durchdenkenden Citizens, die sich als eine Art Superbauern entpuppen. Dieses Denken durchdringt inzwischen alle Bereiche unseres Lebens, von der Schule, wo wir immer ordentlich unsere Hausaufgaben machen sollen, bis ins Berufsleben, in dem die Tugenden der Superbauern als idealer Karriereweg gelten. Abweichungen gelten beinahe schon als krankhaft. Den Nicht-Bauern werden in Randbereichen misstrauisch beäugte Reservate eingeräumt: für Künstler, Lehrer oder Altenpfleger. Sie alle scheinen dem Anspruch der Effizienz nicht zu genügen.

In der heutigen Wirtschaft hat die Bauernkultur ihre eigentliche Heimstatt gefunden, gekrönt von der Idee des Shareholder-Value. Diese verurteilt die Unternehmen geradewegs dazu, immer effizienter zu werden und unaufhörlich positiv in die Zukunft zu blicken. Ein Zurückweichen darf es nicht geben, wir kennen keine Probleme mehr, sondern nur noch Herausforderungen. Es zählt lediglich der messbare Erfolg. Dueck beschreibt, wie dieses Denken zum Verlust all dessen führt, was über das Messen hinausgeht: Zufriedenheit, Innovation, Kreativität. All dies ist in erster Linie nur fühlbar und stört im Zweifelsfall den reibungslosen Ablauf der Maschinerie.

Plötzlich erscheinen aber Akteure, die sich dem Diktat des Messbaren entziehen, aber gerade darum erfolgreich sind. Vorreiter dieser Bewegung ist der „E-Man“, der intuitiv, risikobereit und abruptem Wandel aufgeschlossen der Bauernwirtschaft trotzt. Diese antwortet gemäß ihrer bewährten Logik, indem sie versucht, noch effizienter zu arbeiten, nach der Devise „Nun seien Sie doch mal kreativ“. In ihrem Hang zum Tugendexzess verliert sie jedoch die Frage nach dem Sinn des Ganzen aus den Augen. Ob die Entstehung der E-Welt einer globalen Kommunikation und Interaktion diese Entwicklung ausgelöst oder nur beschleunigt hat, mag zweitrangig erscheinen. ▶

Dueck sieht, dass der E-Man ein Überdenken der bestehenden Tendenzen nötig macht. Er plädiert für eine Balance der Charaktere, in der sowohl Jäger als auch Bauern ihren Platz finden. Wenn jedoch unser Denken in der Optimierungslogik verhaftet bleibt, wenn wir also das Jägerartige nur akzeptieren, weil es in einem gewissen, nicht messbaren Sinn „optimaler“ ist, finden wir uns unversehens auf dem Tugendpfad der Effizienzsteigerung wieder. Wichtig ist es, mit dem Überdenken der Strukturen zu beginnen, auch wenn der Appell zur Umkehr noch keinen Weg aus der Sackgasse weist. Gunter Dueck hat in dieser Hinsicht mit seiner packend geschriebenen Problemanalyse auf jeden Fall einen ermutigenden Schritt in die richtige Richtung getan.

Uwe Riß

Der Rezensent arbeitet als Entwickler bei der SAP Portals Europe GmbH in Walldorf.

MEDIZIN

Klaus Heilmann

Das Risiko der Sicherheit

Hirzel, Stuttgart 2002. 167 Seiten, € 18,–

Die Menschen sind verwöhnt durch die Segnungen der Wohlstandsgesellschaft, sie sind dumm und weder fähig noch willens, diesem Zustand abzuhelfen. Insbesondere überschätzen sie maßlos das Risiko des Medikamentengebrauchs oder setzen dieses zumindest mit den Risiken des Nichtgebrauchs nicht ins richtige Verhältnis. Die Medien mit ihrer auf einzelne Opfer zentrierten Berichterstattung, ohne den Blick aufs Ganze, tun alles, diese Fehleinschätzung zu verstärken. Und deswegen leben wir schlechter und vor allem kürzer, als es unter anderen Umständen möglich wäre.

Das kann ja alles stimmen. Es macht die Lektüre nur etwas mühsam, dass der Autor einem diese Überzeugung eher unterschwellig, aber penetrant und weinerlich aufdrückt. Wer jedoch darüber hinwegliest, wird mit einer Fülle interessanter Fakten belohnt.

Klaus Heilmann, Professor der Medizin sowie „Risikomanager, Kommunikationsexperte, Publizist und TV-Pro-duzent“ (Klappentext), rechnet uns vor, dass eine fünfjährige Verzögerung der Zulassung eines neuen Medikaments schätzungsweise 75000 Menschen das Leben gekostet hat. Die 1975 getroffene Entscheidung offizieller Stellen, die Schutzimpfung gegen Keuchhusten nicht mehr allgemein zu empfehlen, musste 1991 widerrufen werden, weil die Risiken der Impfung weit überschätzt worden waren. Die Antibabypille wäre wegen vermehrter Herzattacken und Schlaganfälle fast verboten worden; erst langjährige Erfahrung gestattete eine realistischere Einschätzung der Risiken.

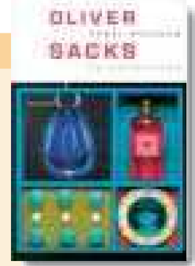
Der Autor bringt auch Daten, die seine Position nicht unbedingt unterstützen. So gelang es einer einzelnen Frau in der amerikanischen Arzneimittel-Zulassungsbehörde FDA, die Zulassung von Thalidomid, dem Wirkstoff von Contergan, so lange hinauszuzögern, dass den USA eine Contergan-Katastrophe erspart blieb.

Und die letzte, spärlich erläuterte Tabelle des Buches („Verlorene Lebenserwartung durch Einzelentscheidungen“) zeigt, dass statistische Daten doch etwas sorgfältigerer Interpretation bedürfen. So kostet einen die Entscheidung, eine Flugreise anzutreten, wegen der damit einhergehenden Unfallgefahr statistisch gemittelt knapp zwei Lebensstunden; für Anschaffung und Nutzung eines Kleinwagens muss man knapp fünf Tage opfern. Aber die gefährlichste von allen aufgeführten „Entscheidungen“ ist „männlich und unverheiratet sein“. Sie kostet einen, im statistischen Durchschnitt wohlgemerkt, neuneinhalb Lebensjahre. Dagegen sind Zigarettenrauchen (sechs Jahre bei Männern) und dreißig Prozent Übergewicht (3,6 Jahre) geradezu harmlos.

Christoph Pöppe

Der Rezensent ist Redakteur bei Spektrum der Wissenschaft.

KINDHEIT UND CHEMIE

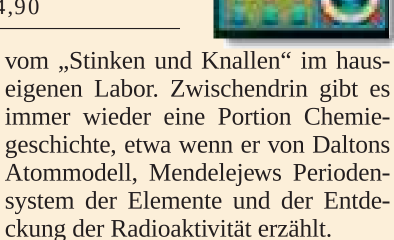


Oliver Sacks

Onkel Wolfram

Erinnerungen

Aus dem Englischen von Hainer Kober.
Rowohlt, Reinbek 2002. 384 Seiten, € 24,90



Der Titel führt gleich mehrfach in die Irre: Der Name „Wolfram“, den Oliver Sacks seinem Onkel wegen dessen Fabrik für Glühbirnen mit Wolframdrähten gab, meint das Metall (im Original *tungsten*) und nicht den deutschen Vornamen. Außerdem ist es mit den „Erinnerungen“ nicht weit her, denn Geschichten aus Sacks' Kindheit und Details über ihn und seine Familie gibt es nur am Rande. So erfährt man auch fast nichts darüber, wie er zu dem berühmten Neurologen, Bestsellerautor („Der Mann, der seine Frau mit einem Hut verwechselte“) und Helden des Films „Zeit des Erwachens“ (mit Robin Williams) wurde.

Sacks hatte nur eine große Liebe in seiner Kindheit, die er beim Schreiben des Buches wiedergefunden und darüber so manches Autobiografische vergessen hat: die Naturwissenschaften – insbesondere die Chemie. Er begeistert(e) sich für Mineralien, Fotografie, Reibungselektrizität, Spektroskopie, Radioaktivität und Meeresbiologie. In seinem Buch erklärt er uns Phänomene und berichtet detailliert vom „Stinken und Knallen“ im hauseigenen Labor. Zwischendrin gibt es immer wieder eine Portion Chemiegeschichte, etwa wenn er von Daltons Atommodell, Mendelejews Periodensystem der Elemente und der Entdeckung der Radioaktivität erzählt.

Insgesamt ist dies sicherlich ein gutes Buch, das durch die enorme Sachkenntnis und den mitreißenden Erzählstil des Autors besticht. Aber Sacks hat sich nicht entschieden, worüber er schreiben wollte, die Chemie oder seine Kindheit. Sein Buch ist eine eigenartige Mixtur aus beidem. Ein von der Chemie begeisterter Leser kommt dabei bestimmt auf seine Kosten. Wer sich allerdings mehr für den Menschen Sacks interessiert, wird zwar spannende, aber nur spärliche Informationen finden. Mir jedenfalls hätte weniger Chemie und mehr von Sacks besser gefallen.

Imke Ortmann

Die Rezensentin studierte Biologie und Chemie und ist Wissenschaftsjournalistin in Münster.

Eine bunte Welt der Chemie

Mineralien, ein interaktives Periodensystem und Experimente als Kurzfilme – Thomas Seilnacht bietet auf seiner Homepage Chemie-Spaß für jedermann.

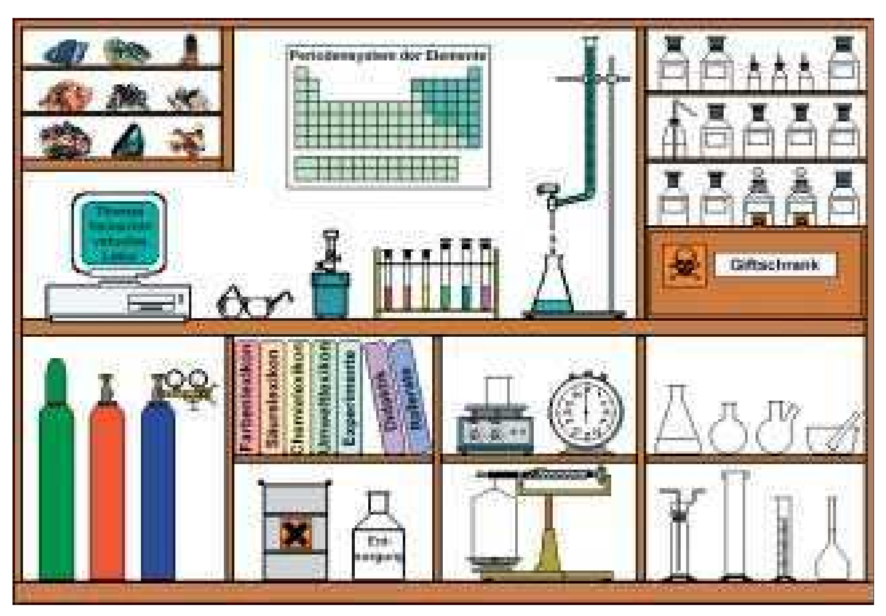
Von Imke Ortmann

Nehmen Sie sich Zeit für http://www.seilnacht.tuttlingen.com/index.htm. Denn was der Realschullehrer Thomas Seilnacht aus Mühlheim an der Donau im Internet seit 1998 aufgebaut hat, ist schon allein vom Umfang her beachtlich. Aber hier stimmt nicht nur die Quantität, sondern auch die Qualität. Unter „Persönliches“ präsentiert sich Seilnacht als ein erstaunlich vielseitiger Mensch: Neben der Chemie unterrichtet er Biologie und Informatik, aber auch Kunst und Musik. Er entwickelt Chemie-Software und ist freier Autor und Fotograf bei Schulbuchverlagen und Zeitschriften.

Der Titel der hübschen bunten Homepage, „Chemieunterricht und Chemiedidaktik“, ist eine maßlose Untertreibung. Zwar wenden sich die Rubriken „Experimente“, „Referate“ und „didaktische Beiträge“ vorrangig oder ausschließlich an Lehrer und Schüler, aber der verbleibende, wesentlich größere Teil des Angebots wird jeden Chemie-Interessierten begeistern.

Absolutes Highlight und eine Augenweide – auch für erklärte Chemie-Muffel – ist die „Mineraliengalerie“ (siehe Bild unten). Von A(damin) bis Z(innober) kann man hier über hundert Mineralien anschauen, in hervorragender Bildqualität und von Seilnacht selbst mit künstlerischem Blick fotografiert.

Das „Periodensystem“ erscheint vielleicht in seiner Gestaltung zunächst weniger beachtenswert, überzeugt aber durch die enorme Informationsfülle. Wie man es aus anderen interaktiven Periodensystemen im Internet schon kennt (http://www.chem.uni-potsdam.de/tools/pse/index.html, http://schulen.eduhi.at/chemie/pse.htm), sind alle chemischen Elemente einzeln anklickbar. Bei Seilnacht erhält man in ansprechender Aufmachung und gut strukturiert Informationen zu Eigenschaften, Vorkommen, Geschichte, Herstellung und Verwendung jedes Elements. Verweise links neben dem Periodensystem bieten noch mehr Daten zu den Elementen (Entdeckung, Häufigkeit, Dichte und vieles andere), Erklärungen chemischer Fachbegriffe und ein von Seilnacht selbst geschriebenes Chemielexikon (zusätzlich gibt es ein Chemikalien- und Umweltlexikon). 67 Kurzfilme, die man allerdings nur über eine sehr neue Version von „RealPlayer“ ansehen kann, zeigen chemische Experimente zu Themen wie Wasserstoff, Kohlenstoff oder Halogenen. Auch Seilnacht selbst tritt dort auf und demonstriert die Mickey-Mouse-Stimme nach dem Einatmen von Helium.



Im Chemie-Regal des „virtuellen Labors“ sind alle einzelnen Gegenstände anklickbar. Von hier gelangt der Anwender zu fast allen Rubriken der Homepage.

Durch einen Klick auf die Reagenzgläser im „virtuellen Labor“ (Bild oben) gelangt man zu den „virtuellen Versuchen“. Mit oder ohne Anleitung kann man Analysen unbekannter Stoffe durchführen und als Bonus eine virtuelle Titration durchführen. Die Rubrik „Phänomen Farbe“ enthält zwar weniger Chemie, dafür aber viele schöne Bilder und Wissenswertes.

Kommerzielles, wie etwa auftauchende Werbung und Hinweise auf käufliche Software, stört den Anwender der Homepage kaum. Durch die übersichtliche Struktur, die geschmackvolle – geradezu liebevolle – Aufmachung und die Fülle von Informationen, die oft mehr als nur Chemie bieten, wird diese Homepage zu einem Surf-Genuss für jedermann. Wer danach Lust auf mehr bekommen hat: Die Freie Universität Berlin bietet eine sehr gute Linkliste zu verschiedenen Themen rund um die Chemie (www.chemie.fu-berlin.de/fb/fachdid/cll/).



Kristalliner Schwefel: nur eines von über hundert Mineralien aus der Galerie

Der Kampf um die Sechsecke

Die Regeln von Hex sind einfach, das Spiel ist endlich, und der Zufall spielt keine Rolle. Aber der Spielverlauf ist voller Überraschungen.

Von Ian Stewart

Probieren Sie das Brettspiel Hex! Man kann davon ebenso süchtig werden wie von den besten Computerspielen, aber es fordert Ihre kombinatorischen Fähigkeiten weit mehr. Cameron Browne, ein Programmierer aus Brisbane (Australien), hat in einem neueren Buch das Spiel mitsamt Anleitungen zum Gewinnen erstmals umfassend dargestellt: ein Leckerbissen für jeden Liebhaber mathematischer Spielereien.

Hex ist ein Zwei-Personen-Spiel, das auf einem rhombusförmigen, in sechseckige Felder eingeteilten Brett gespielt wird (Bild Seite 119). Das Standardbrett hat 11×11 Felder. Nennen wir die Spieler Rot und Blau. Jedem Spieler „gehören" zwei einander gegenüberliegende Ränder des Brettes; die vier Eckfelder gehören beiden Spielern. Außerdem hat jeder Spieler einen Vorrat an Spielsteinen seiner Farbe.

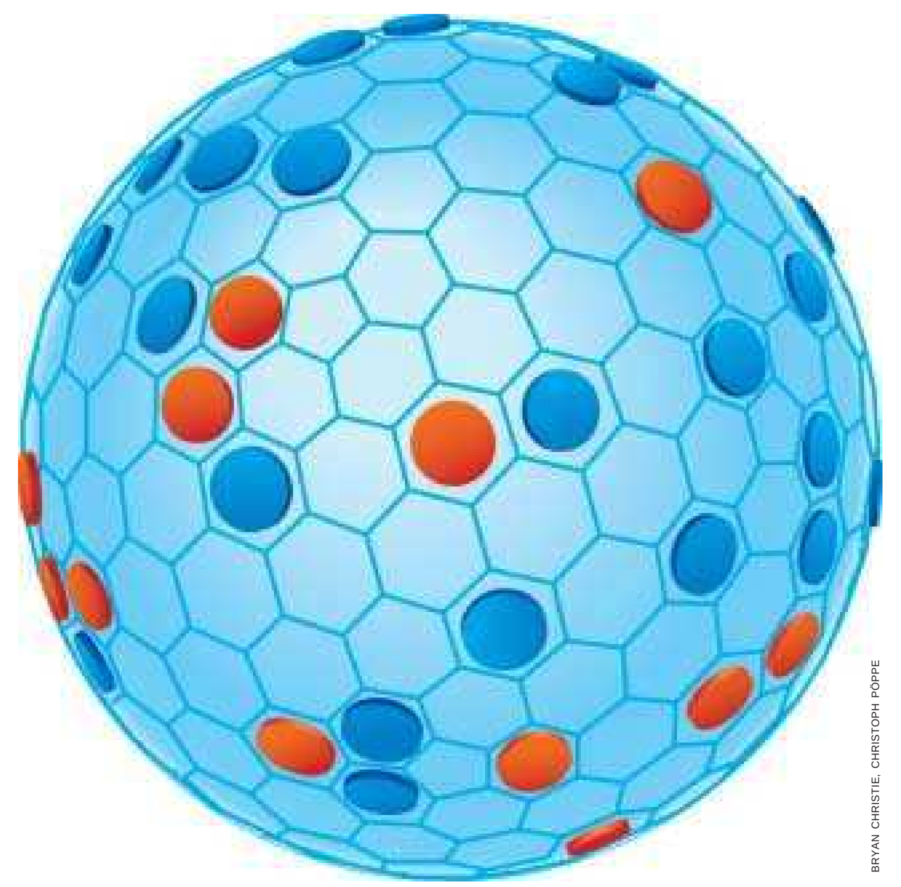
Die Spielregeln sind denkbar einfach: Die Spieler ziehen abwechselnd, indem sie jeweils einen eigenen Spielstein auf ein freies Feld legen. Sieger ist, wer als Erster seine beiden Ränder durch eine Kette aus Spielsteinen miteinander verbunden hat. Die Kette kann beliebig viele Abzweigungen und Schleifen haben; es kommt nur darauf an, dass sie einen zusammenhängenden Weg von einem zum gegenüberliegenden Rand enthält. Das hört sich einfach an, aber der Schein trügt: Hex ist voller Überraschungen und Fallstricke.

Erfinder des Spiels war Piet Hein (1905–1996), ein dänischer Mathematiker, der auch als Dichter bekannt geworden ist. Er nannte sein Spiel „Polygon", und es erschien zuerst in der Ausgabe vom 26. Dezember 1942 der dänischen Zeitung „Politiken". Unabhängig von Hein erfand es 1947 John Nash aufs Neue. Damals war er noch Student an der Universität Princeton; wenig später fand er seine bahnbrechenden Resultate zur Spieltheorie, für die er 1994 mit dem Nobelpreis in Wirtschaftswissenschaften geehrt wurde. In Princeton nannte man das Spiel einfach „Nash" oder auch „John". Martin Gardner beschrieb das Spiel 1957 in seiner Kolumne in „Scientific American", und über Nacht verfielen ganze mathematische Institute in aller Welt dem Hex-Fieber.

Jedes Hex-Spiel hat nur endlich viele Züge: Es endet spätestens dann, wenn alle Felder besetzt sind, also nach 121 Zügen auf dem 11×11-Brett. Eine zusammenhängende Kette eines Spielers blockiert jede Kette des anderen Spielers. Ein Unentschieden kann es nicht geben. Ein Spieler kann seinen Gegner nämlich letztlich nur dadurch an der Konstruktion einer siegreichen Kette hindern, dass er selbst eine solche Kette konstruiert.

Man kann sogar beweisen, dass der erste Spieler bei optimalem Spiel gewinnen kann. Der Beweis beruht auf dem Prinzip des Strategiediebstahls. Nehmen wir an, Rot zieht zuerst, und es gäbe eine Gewinnstrategie für Blau, den zweiten Spieler. Wenn das so wäre, könnte aber Rot die Gewinnstrategie selber anwenden, um Blau zu schlagen. Dazu genügt es, dass Rot seinen ersten Stein schlicht vergisst, sowie er ihn gesetzt hat. Er tut so, als habe Blau das Spiel eröffnet, und er selbst sei der nachziehende und nicht der anziehende Spieler. Welchen Zug nun Blau auch macht, Rot setzt seinen Stein auf das Feld, das die (angeblich existierende) Strategie für den Nachziehenden vorschreibt. Und wenn das nun gerade das Feld ist, das er in seinem „vergessenen" Eröffnungszug belegt hat? Das macht nichts; dann liegt ja schon ein roter Stein auf dem zu besetzenden Feld. Rot macht also irgendeinen anderen Zug, und dieser wird der neue „vergessene" Zug.

Wenn Rot so fortfährt, kann er nach der Annahme den Sieg erzwingen. Aber nun befinden wir uns in einer merkwürdigen Situation. Rot beginnt das Spiel, stiehlt, wie beschrieben, Blau seine angebliche Gewinnstrategie für den zweiten Spieler und gewinnt damit, einerlei wie



BRYAN CHRISTIE, CHRISTOPH PÖPPE

Ein Fußball der etwas anderen Art: Diese in Fünf- und Sechsecke eingeteilte Kugel ist ein Spielbrett für sphärisches Hex. Bei diesem Spiel gewinnt derjenige, dem es als Erstem gelingt, eine leere oder vom Gegner besetzte Zelle mit eigenen Steinen einzukreisen.

Blau spielt. Die einzige Möglichkeit, diesen Widerspruch aufzulösen, besteht darin, dass es keine Gewinnstrategie für den nachziehenden Spieler gibt. Da aber das Spiel endlich ist und es kein Unentschieden gibt, muss es eine Gewinnstrategie für den anziehenden Spieler geben.

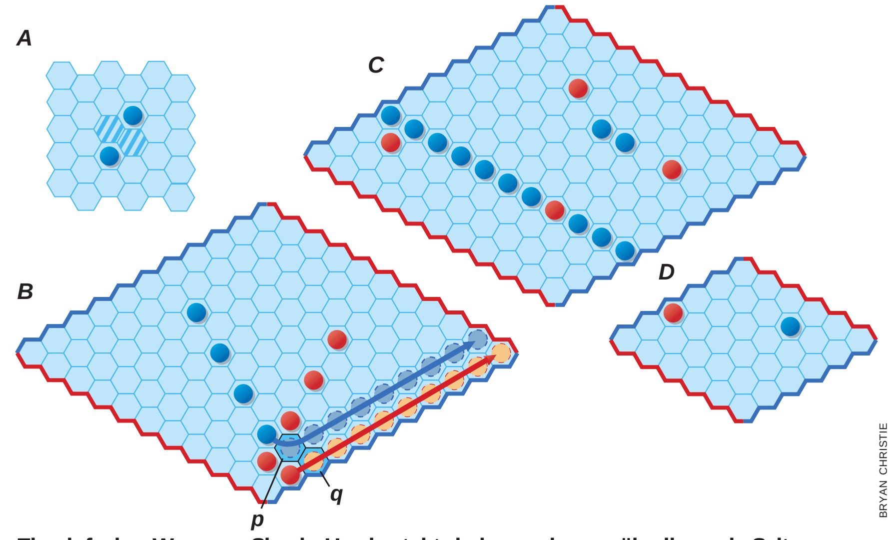
Auf den ersten Blick ist das Spiel damit langweilig: Man weiß von vornherein, wer gewinnen wird, wenn beide Spieler der Gewinnstrategie folgen. Nur geht diese Strategie aus dem Beweis nicht hervor und ist auch nicht einfach zu finden. Nur bis zum Format 7×7 ist sie bekannt. Schon auf einem 8×8-Brett weiß der Anziehende zwar, dass er mit Sicherheit gewinnt, wenn er perfekt spielt, hat aber keine Ahnung, wie er dabei zu Wege gehen müsste.

Gleichwohl bleibt ein großer Vorteil für den anziehenden Spieler. Um diesen auszugleichen, vereinbaren manche Spieler eine weitere Regel: Wenn der Anziehende seinen ersten Zug gemacht hat, darf der zweite Spieler den gesetzten Stein gegen einen eigenen austauschen, statt auf ein freies Feld zu setzen. Der erste Spieler bietet damit dem zweiten an, nach dem ersten Zug die Rollen zu tauschen, und tut daher gut daran, seinen ersten Stein so zu setzen, dass er ihm weder Vorteile noch Nachteile verschafft; andernfalls könnte sein Gegner einen Vorsprung nutzen.

Eine ausführliche Besprechung von Hex würde diese Kolumne für fünf Jahre füllen. Ich will mich daher auf zwei wesentliche Aussagen konzentrieren. Die erste ist jedem offensichtlich, der das Spiel ein paar Mal gespielt hat: Auch unbesetzte Felder können eine strategische Bedeutung haben. Teil *A* im Bild oben zeigt eine „Brücke“. Die Pfeiler sind zwei von Blau besetzte Felder; dazwischen liegen zwei freie, gemeinsame Nachbarfelder. Damit sind die blauen Pfeiler so gut wie verbunden; denn sobald Rot eines der Felder besetzt, kann Blau das andere besetzen. Hex-Spieler versuchen oftmals Ketten aus solchen Brücken über das Brett zu bauen.

Eine Brücke ist nicht unbesiegbar. Wenn es Rot gelingt, eines der Zwischenfelder zu besetzen und dabei gleichzeitig mit einem Gewinnzug zu drohen, ist die Brücke durchbrochen. Aber das ist meist ein schwieriges Unterfangen; besser ist es, den Gegner möglichst wirksam am Brückenbau zu hindern.

Die zweite Aussage: Die Kette eines Spielers ist nur so stark wie ihr schwächstes Glied. Wenn Ihr Gegner einen Teil Ihrer heranwachsenden Kette mit guten Erfolgsaussichten angreift, dann sollten Sie ihr schwächstes Glied verstärken oder Ihrerseits seine Kette angreifen. Um Ihre Absichten zu verbergen, ist es oft ratsam, sich aus einiger Entfernung an seine schwachen Punkte heranzuschleichen.



Ein einfacher Weg zum Sieg in Hex besteht darin, zwei gegenüberliegende Seiten des Spielfeldes durch eine Kette von Brücken zu verbinden. Ein Spieler baut eine Brücke (*A*), indem er zwei Felder besetzt, die zwei gemeinsame, unbesetzte Nachbarn haben (gestreift). Zu den fortgeschrittenen Spieltechniken gehört der Bau von Leitern. In diesem Beispiel (*B*) gewinnt Rot das Leiterduell. Bei den Knobelaufgaben *C* und *D* ist der nächste Zug von Rot zu finden, der mit Sicherheit zum Sieg führt.

Eine höhere Kunst ist die Beherrschung von Leitern. Sie entstehen, wenn ein Spieler die letzte Lücke zu seinem Rand zu schließen versucht. Teil *B* im Bild oben zeigt den Beginn der Leiter mit Blau am Zug. Blau muss auf Feld *p* setzen, sonst kann Rot das Spiel gewinnen. Aus dem gleichen Grund muss Rot dann Feld *q* besetzen. Wenn Blau weiter versucht, eine Verbindung zu seinem Rand herzustellen (und das muss er über mehrere Züge, wenn er nicht verlieren will), dann muss Rot weiter blockieren, und es entstehen zwei parallele Ketten aus roten und blauen Steinen entlang des Randes. Blau hat nicht rechtzeitig bemerkt, dass Rot gewinnen wird, wenn das so weitergeht. Es ist wichtig, gegnerische Leitern zu blockieren, ehe sie überhaupt in Gang kommen. Blau hätte das Leiterrennen gewonnen, wenn er früher im Spiel einen seiner Spielsteine in die Nähe des Randes gesetzt hätte.

Gegen Leitern hilft nur Vorbeugen

Neben solchen Fragen werden in dem Buch „Hex Strategies“ auch unzählige Varianten des Spieles besprochen. Das Spiel „Y“ wird auf einem dreieckigen Brett gespielt; es gewinnt der Spieler, dessen Kette zuerst alle drei Seiten des Dreiecks miteinander verbindet. Wie bei Hex kennt man auch hier nur für sehr kleine Bretter eine Gewinnstrategie.

Oder man spielt Hex auf einer Landkarte der USA. Als Felder dienen die Staaten; der eine Spieler hat die Nord- und die Südgrenze miteinander zu verbinden und der andere die beiden Ozeane. Wenn der Nord-Süd-Spieler den ersten Zug hat, kann er gewinnen, indem er im ersten Zug Kalifornien besetzt.

Hex lässt sich sogar auf einer Kugel spielen, deren Oberfläche in Fünf- und Sechsecke eingeteilt ist (Bild links). Der Spieler, dem es gelingt, ein leeres oder vom Gegner besetztes Feld einzukreisen, hat gewonnen.

Zum Schluss habe ich noch zwei Hex-Probleme für Sie, mit denen Sie sich in Ihrer Freizeit beschäftigen können. Das erste (Bild oben, *C*) ist Heins Originalartikel über das Spiel entnommen. Die Aufgabe besteht darin, das Feld zu finden, auf das Rot spielen muss, um den Sieg zu erzwingen. Wenn Ihnen das zu einfach ist, probieren Sie doch die Stellung in *D*, die der Programmierer Bert Enderton aus Pittsburgh für das 6×6-Brett erfunden hat. Wieder ist das Feld zu finden, auf das Rot setzen muss, um zu gewinnen. ■

Literaturhinweis

Hex Strategy: Making the Right Connections. Von Cameron Browne. A. K. Peters, Natick (Massachusetts) 2000.

Ian Stewart *ist Professor für Mathematik an der Universität von Warwick in Coventry (England).*